

L á s z l ó J a k u c s :

Dynamische Unterschiede des Verkarstungsprozesses in den Mikroräumen

Es ist bekannt, dass das Klima bei der Intensitätsregelung des Verkarstungsprozesses von entscheidender Bedeutung ist. Im Laufe unserer früheren Untersuchungen hat sich eine breite Skala von Beweisen erschlossen, die begründeten, die Klimavarianzen der Verkarstung in den Mittelpunkt der morphogenetischen Analyse zu stellen.

Wir können wohl sagen, dass die Karstkorrosion der Kalkgesteine im wesentlichen nichts anderes ist, als die formale Widerspiegelung der biologischen und chemischen Entwicklungserscheinungen der das Gestein überlagernden Bodensphäre im löslichen anstehenden Gestein. Es ist aber zunächst ein wichtiger Umstand, dass diese biologischen und chemischen Entwicklungserscheinungen in ihrer Grössenordnung und Beschaffenheit entscheidend klimagenetisch orientiert sind.

Bei der Karstdenudation der gleichen lithologischen, tektonischen, orographischen, zunächst aber unterschiedlich klimazonenbedingten Kalksteingebieten ergibt sich also vielfache Unterschiede der Grössenordnung und der grundlegenden Beschaffenheit allein aus der Ursache, dass die Temperatur- und Niederschlagskennwerte dieser Räume

unterschiedlich sind und deshalb an ihrer Oberfläche spezifische Vegetations-typen leben und sich verschiedene bodenbiologische /folglich auch chemische/ Vorgänge abspielen.

Die vorstehende Aussage wird durch die internationalen und ungarischen Forschungsergebnisse der letzten Jahre überzeugend bewiesen. Es ist also aktuell, einen Schritt weiter zu gehen. Wenn es sich nämlich beim Vergleich der voneinander geographisch entfernt gelegenen Gebiete als wahr erwies, dass die Differenzen der Niederschlagsmengen und der Wärmemengen - besonders durch biochemische Vermittlung - karst-dynamische Stufungen hervorrufen, soll es auch dann wahr sein, wenn klimatisch unterschiedlich bedingte Gebiete miteinander verglichen werden, die voneinander in geographisch nicht weiten Abstand entfernt gelegen sind. Das heisst, die Entfernung spielt bei dieser Frage gar keine Rolle.

Anders gesagt soll das bedeuten, dass der Verkarstungsprozess in einem bestimmten Mikroräum jeweils durch die mikroklimatologischen Kennwerte der betreffenden Stelle bedingt wird, die selbst nicht allein vom Mikroklima des Gebietes abhängig sind.

Die planetarische Zonalität des Mikroklimas kommt im Verkarstungsprozess soweit zur Geltung, wie sie innerhalb des Klimabereiches auf die Eigenarten und Verteilungsproportionen der einzelnen Mikroklimaräume bestimmend wirkt. Und soweit die unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten hinsichtlich der Orographie, Exposition, des Windschutzes usw. innerhalb desselben Klimabereiches solche Kleinaräume mit extremen Eigenschaften des Mikroklimas gestalten, deren Faktorkennzeichen von den allgemeinen Faktorkennzeichen der Klimazone erheblich abweichen, wird auch die lokalen

Intensität ihrer Verkarstungsprozesse von dem für den Mikroräum /Bereich/ bezeichnenden globalen Verkarstungsprozess abweichen. Das intrazonale Auftreten der meisten karstmorphologischen Gepräge der Extrazonalität hängt damit zusammen. In einer Region muss also die Beschaffenheit des Abtragungsprozesses der Oberfläche so erläutert werden, als das statistische Mittel der einander nicht notwendigerweise ähnelnden konkreten Denudationsvorgänge zahlreicher, die Region gestaltender Mikroräume.

Es versteht sich von selbst, dass sich unsere vorstehende Feststellung nicht allein auf die karstige Denudation bezieht, aber der Zielsetzung unserer Arbeit entsprechend wollen vor nun die Frage, dieselben Beispiele beibehaltend, weiter analysieren. Im folgenden müssen wir als das Wichtigste die kleinsten physisch-geographischen Landschaftseinheiten bestimmen, bei denen die Intensitätsstufen der Verkarstung auslösenden Unterschiede des Mikroklimas in der Form noch zum Ausdruck kommen können.

Es ist merkwürdig, dass bisher keine Ansätze zum synoptischen Studium dieser Themengruppe von der Seite der Geomorphologen weder in Ungarn, noch im Auslande erfolgten. Deshalb sind wir gezwungen, uns ausser unseren eigenen Untersuchungen vor allem auf die von einigen bahnbrechenden Klimatologen, Pedologen und Biologen Kollegen im Laufe von ganz anders gerichteten Analysen erschlossenen Ergebnisse zu stützen. So denken wir vor allem an die Forschungen von R. WAGNER, die über die genaue Klärung der Begriffe

der Mikroklimas unterschiedlicher Größenordnung hinaus ein beträchtliches und längere Zeitreihen umfassendes wertvolles Beobachtungsmaterial über das Karstgebiet zur möglichen Beurteilung der morphogenetischen vermutlichen Verbindungen gewähren /WAGNER 1954, 1955/1-2, 1956, 1960, 1964, FUTÓ 1962, BÁRÁNY 1967 usw./. Aber sehr vielsagend sind die Untersuchungen von Pedologen - an unser Thema anschliessend vor allem von D. FEHÉR /1954/ - über die Bodenatmung, ferner die phytozoenologischen Forschungen, die die Pflanzenassoziationsstypen eines Karstgebietes von homogenem Gesteinsmaterial in mikroklimatischer Interpretation analysieren /BACSO-ZOLYOMI 1934, P. JAKUCS 1954, 1955, 1956, 1961, 1962/.

Hauptsächlich nach den oben erwähnten Autoren wissen wir, dass es z. B. an den Karstoberflächen der Ungarischen Mittelgebirge beträchtliche mikroklimagenetische Unterschiede der Bodenintensität gibt, und zwar nicht nur in den Vorgängen der Rhizosphäre der die nördlich oder südlich exponierten Hänge begleitenden eigenartigen Waldgesellschaften, Buschwälder und Steppenwiesen /also z. B. auch innerhalb einer einzigen Do-line/, sondern auch in davon viel geringeren Raummosaiken /z. B. in der Wurzelkrone von zwei benachbart lebenden Pflanzenarten/. Besonders nachdrücklich bezieht sich das auf das gegenseitige Verhältnis der Kohlendioxidproduktion, die von der Tätigkeit der Bodenmikroorganismen quantitativ in sehr empfindlicher Weise abhängig ist, und der Bodenatmung. Gerade diese sind aber hinsichtlich der Verkarstungsbereitschaft des vom Boden zum Karst hin versickernden Wassers die wichtigsten, aggressivitätsbestimmenden Faktoren.

Wenn es also nachweisbar ist, dass es z. B. bei den Wärmemengen, dem Verlauf der Erwärmungs- und Abkühlungskurven, den Niederschlagsmenge, Bodenfeuchtigkeit usw. der N- und S-, sowie der O- und W-exponierten Hänge Unterschiede in mikroklimatischem Sinne, aber von bedeutender Grössenordnung gibt, ziehen diese als Postulate nach sich auch die Unterschiedlichkeiten der an ihnen lebenden natürlichen Vegetation und der damit im Zusammenhang stehenden Bakterienflora, Bodendurchfeuchtung usw. der Pedosphäre, woraus dann die partielle dynamische Teilung des Karstprozesses der Doline ergibt. Das heisst, die korrosive Denudation wird an den unterschiedlich exponierten Hängen der Doline zwangsmässig anderartig sein. Aus diesem Umstand ist doch bereits nicht schwer die Folge zu ziehen, dass die Form und das Gesicht der Karstdolinen die formale Widerspiegelung der Anordnung ihrer Mikroklimaräume sind.

Im weiteren untersuchen wir einige von den Voraussetzungen der Aussage, die im vorstehenden nur noch als Arbeitshypothese abgefasst wurde.

WAGNER ermittelt unter anderem in einer Doline des Kőzepbérc auf dem Bükk-Plateau im Vergleich zu den früheren Quellen /BACSÓ-ZÓLYOMI 1934, LÁNG 1953, GEIGER 1961, FUTÓ 1962/ ausführlichere Angabenreihen von Mikroklimamessungen, mit deren Hilfe er auch in der Grössenordnung der Werte die eigenartigen Wärmeunterschiede des Innern der Dolinen und ihre Tendenzen genau konkretisiert /WAGNER 1960, 1962, 1964, AMBRUS 1965, GOMÖRI 1967/. Danach erwärmen sich in Ungarn am kräftigsten und am meisten andauernd die südöstlich, südlich exponierten Hänge der Dolinen, während die nordöstlich, nördlich

exponierten Flanken am kühlgsten erhalten bleiben. Die O- und W-Expositionen einer Doline miteinander verglichen sind aber immer die gegen O hin liegenden Flanken die wärmeren.

Die Temperaturunterschiede der einander gegenüber liegenden Hänge sind besonders in den Morgenstunden auffallend, da es in den bodennahen Luftschichten der O- und SO-Expositionen im Sommer Wärmegradifferenzen von sogar 10 oder noch darüber °C entsprechend vorkommen kann. Am Nachmittag hingegen, da die westlichen Hänge der direkten Sonnenstrahlung unterliegen, bleiben die Wärmegradunterschiede umgekehrt verglichen niedriger erhalten.

Noch merklicher zeigt sich die Unterschiedlichkeit der Erwärmung bei Tag und des Wärmebetrags der südlichen und nördlichen, und zunächst darüber hinaus der östlichen und westlichen Expositionen beim Vergleich der Bodentemperaturen. In Abbildung 1, werden die auf eine Bodentiefe von 2 cm bezogenen Beobachtungen der in vier unterschiedlichen Expositionen angelegten Bodenklimastationen einer Doline dargestellt.

Die Grössenordnungen der Amplitude widerspiegeln vornehmlich die Unterschiede der Hangneigungen; aber insbesondere der eigenartige Verlauf der Erwärmungskurven der östlichen und westlichen Expositionen, die Verschiebung der Maximumstellen, die steigenden Kennwerte des die Erwärmung bezeichnenden Flügels des Diagrammas enthalten partial auch die Gepräge der übrigen Faktoren, die eine erhöhte Kontinentalität der Osthänge verursachen.

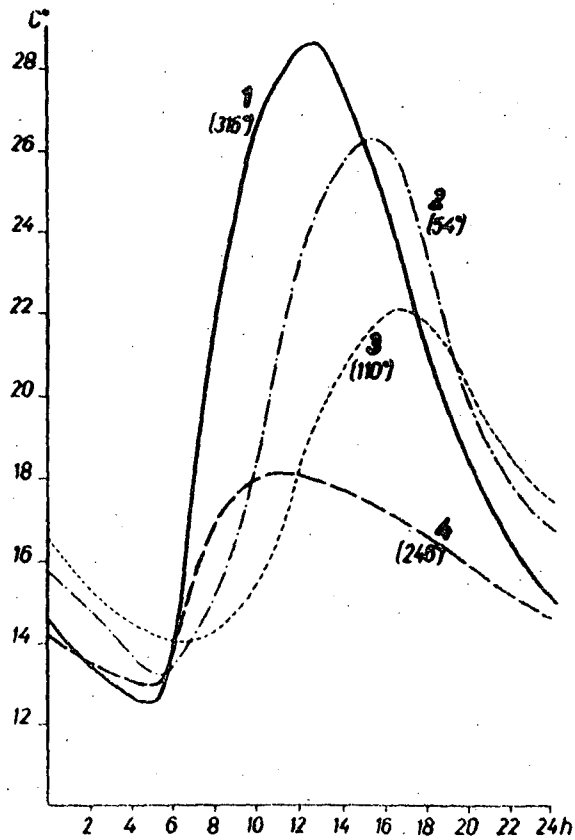


Abb. 1. Bodentemperaturkurven gemessen in einer Tiefe von 2 cm der bei unterschiedlichen Expositionen angelegten Bodentemperatur-Messtationen in einer Doline des Kőzepérc des Bükkgebirges. Die Diagramme des Wärmeverlaufs von 24 Stunden sind an Hand der Durchschnittswerte des an vier aufeinander folgenden Tagen /6-7-8-9 August 1965/ aufgenommenen Beobachtungsmaterial von R. WAGNER verfertigt.

In dieser Beziehung ist die komplexe Durchsetzung von mehreren Faktoren wahrzunehmen. Von ihnen heben wir nur einige hervor:

1. In den Morgen- und Vormittagsstunden ist es im allgemeinen weniger bewölkt, als nachmittags.

2. Die Südexposition erhält bereits am Morgen den aus der direkten Sonnenstrahlung stammenden und für die Erwärmung des Bodens massgebenden Wärmebetrag. Während der gleichen Zeit wird der nördlich exponierte Boden durch die Luft von niedriger spezifischer Wärme infolge der Wärmeleitung nur sehr langsam erwärmt. In den Nachmittagsstunden hingegen, da die W-Expositionen die direkte Sonnenstrahlung erhalten, kann die Abkühlung durch Wärmeausstrahlung der O-exponierten Hänge nur langsam vor sich gehen, da sich die mit dem Boden in Kontakt stehende Luft bei Tag stark erwärmt. Die O-Exposition ist also die ganze Strahlungsdauer hindurch warm, während die W-Expositionen nur am Nachmittag warm sind.

3. Bei Starkregen sind im Sommer nachmittags häufiger, als vormittags. Deshalb wird die direkte Strahlungswärmekalorie in den Tageszeiten der intensiven Erwärmung der westlichen Expositionen für die Verdunstung öfters verbraucht, als am östlich exponierten Hang.

4. Wegen der gleichzeitig mit dem Regenfall vorherrschende und den Einfallswinkel des Niederschlags regulierende Windrichtung /W-NW/ erhalten die östlich, südöstlich exponierten Hänge statistisch mehr Niederschläge, als die westlich und nordwestlich exponierten Dolinenhänge von gleicher Neigung.

Die Tagesgänge der eigenartigen Bodentemperatur der unterschiedlichen Expositionen wirken natürlich nicht nur in der Bodentiefe von 2 cm, sondern bestimmen praktisch den Wärmehaushalt des völlig aktiven Bodenprofils. Die Vorgänge der Pedosphären der östlich und südlich exponierten Dolinenhänge werden dadurch immer extremer im Vergleich zu denen der westlich und nördlich exponierten Hänge. Das ist besonders gut ersichtlich aus der täglichen Temperaturschwankung in der Bodentiefe von 30 cm, in welcher Tiefe bei den westlich exponierten Böden eine Temperaturveränderung kaum bemerkbar ist.

Die oben dargestellten sehr bedeutsamen Unterschiede - innerhalb der Doline - im Charakter des Wärmemenge, der Niederschlagsmenge und der Erwärmung wirken durch mehrseitige Verbindungen auf die CO_2 -Produktion des Dolinenbodens, die Intensität der Bodenatmung, die Bodenfeuchtigkeit, die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Vegetation und der Mikroflora, Fauna usw. des Bodens und durch all dies, letzten Endes, selbst auf den Verkartsungsprozess, auf dessen lokale dynamische Unterschiede.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens der unterschiedlich exponierten Dolinenhänge steht z. B. u. a. in unverkennbarer Beziehung zum Ausmasse der Sonneneinstrahlung und zum Erwärmungsgrad. Das wird auch durch die Ergebnisse unserer ausführlichen Dolinenaufnahme bestätigt, die wir in einer bepflügten und so zur Untersuchungszeit /Mai 1962/ als vegetationslos zu betrachtenden Doline des Nord-Borsoder Karstes /Etwa 1300 m weit in NNO Richtung vom Glockenturm der reformierten Kirche von Jósvalö entfernt/ unternommen hatten. Die Ergebnisse der Bestimmung durch Austrocknenverfahren des Feuchtigkeitsgehaltes der aus einem 10 cm tiefen Bodenhorizont entnommenen Proben haben wir in Abbildung 2 in interpolierter Form dargestellt.

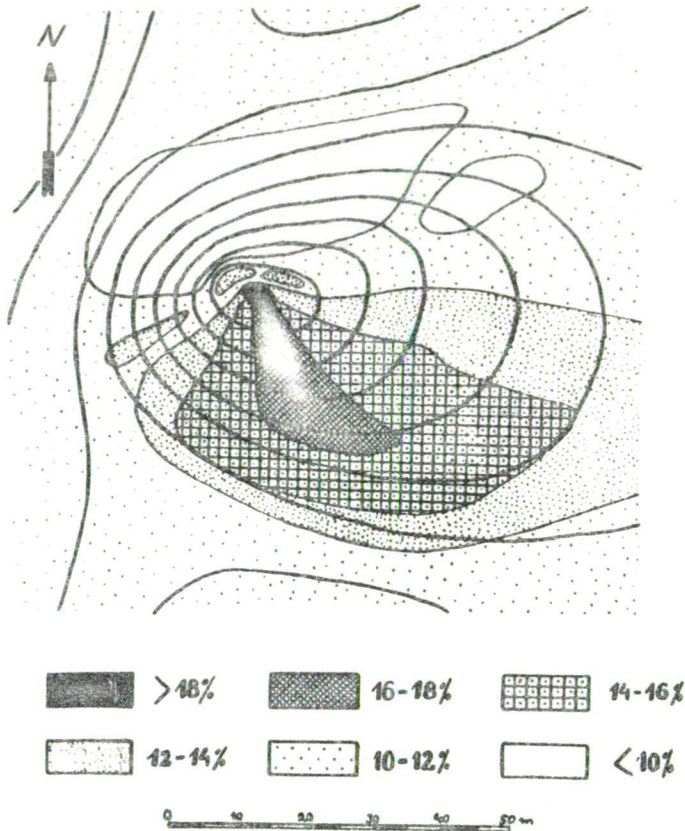


Abb. 2. Beispiel für die Anordnung der Bodenfeuchtigkeit in einer vegetationslosen /bepflügten/ Doline von gleichmässiger Bodenbeschaffenheit in einer Tiefenlage von 10 cm. Die Werte der Bodenfeuchtigkeit sind in Gewichtprozent ausgedrückt eingetragen. Die Höhenlinien stellen die Isohypsen von je 1 m Abstand dar. Die Interpolation der Karte haben wir an Hand von 81 Beobachtungen /nach einem Gitternetz von 10 m-Quadrat/ durchgeführt /originell/.

Im vorangehenden haben wir bestätigt, dass es auch innerhalb einer einzigen Doline beachtenswerte Unterschiede der Bodentemperatur und der Bodenfeuchtigkeit gibt und die Anordnung dieser Faktoren mit dem Verhältnis nach Himmelsrichtungen verbunden ist. Die weitere Ausführung der Gedankenreihe in der Richtung des Beweisschlusses über die mikroklimatische Bedingtheit der dynamischen Differenzen der Karstkorrosion liegt auf der Hand.

Einer der grundlegenden Sätzen der Biologie auf der Ebene der Handbücher ist, dass die Lebensfunktionen der im Boden lebenden Mikroorganismen auf die Wärmeveränderungen des Bodens empfindlich reagieren. D. FEHÉR /1954/ teilt das von RUSSEL veröffentlichte Diagramm mit, das die auch vom Tagesgang der Temperatur empfindlich abhängigen Schwankungen der Bakteriananzahl des Bodens deutlich darstellt /Abb. 3/.

Im Besitze von seit langem durchgeführten Versuchsreihen und eines Beobachtungsmaterials weils aber FEHÉR auch auf den Umstand hin, dass die optimale Temperatur an sich noch kein ausreichendes Kriterium für das Antreiben einer Population der Bodenmikroorganismen sei, sondern es kann allein durch die gleichzeitige Einwirkung der Temperatur- und Bodenfeuchtigkeitsoptima gewährleistet werden. Nach seinen Untersuchungen, die neulich auch von BECK /1968/ unterstützt wurden, kann das Daseinsoptimum vom Gesichtspunkt der Virulenz und Vermehrung der Bakterienflora im Boden aus durch eine Temperatur von 25° C und gleichzeitig die etwa 25 Gewichtsprozent ausmachende Bodenfeuchtigkeit gesichert

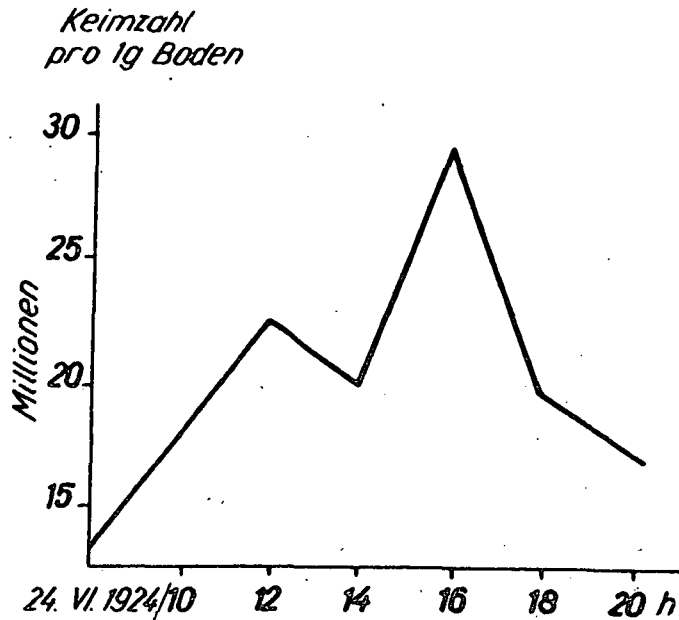


Abb. 3. Veränderung der Anzahl der im Boden lebenden Bakterien 12 Stunden hindurch in Abhängigkeit des Tagesganges der Temperatur des untersuchten Bodenhorizonts /Beobachtung von RUSSEL 1924/.

werden, natürlich unter den entsprechenden Bodendurchlüftungsbedingungen. Die Abnahme oder Zunahme eines jeden Faktors ergibt sogleich die kräftige Abnahme der Bakterienanzahl. Die Grössenordnungen der Zusammenhänge können wohl in Abb. 4. auch zahlenmässig erfasst werden.

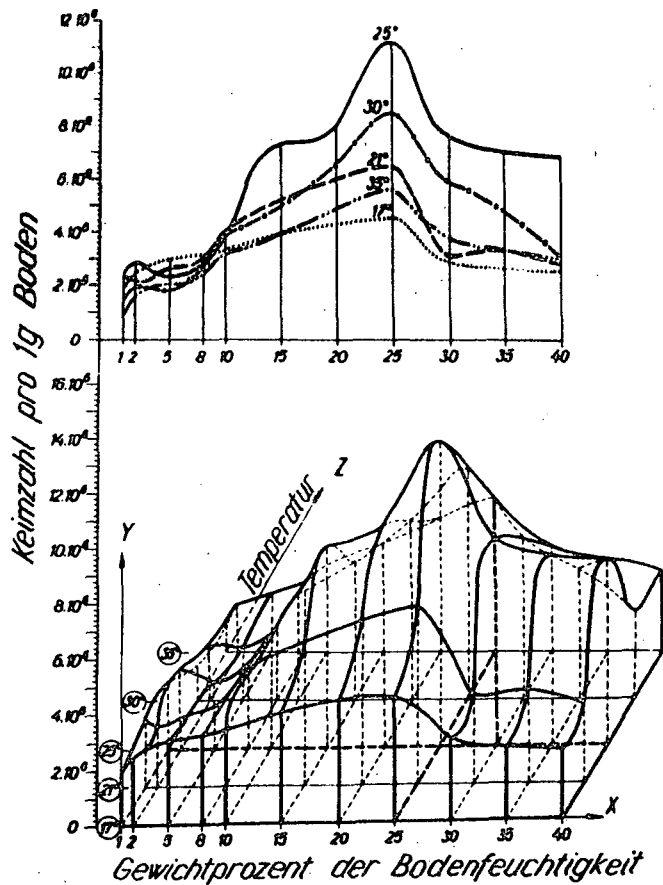


Abb. 4. Die biologische Aktivität der Bodens dar-
 legende räumliche Kurve, woran die Widerspiegelung
 der komplexen Einwirkung der Temperatur und der
 Feuchtigkeit durch die Bodenbakterienanzahl auch
 zahlenmässig abzulesen ist. Die Werte der X-Achse
 bezeichnen die Bodenfeuchtigkeit in Gewichtspro-
 zent, die der Z-Achse die Bodentemperatur in °C
 angegeben, während die Werte der Y-Achse die auf
 1 g Boden bezogene Bakterienanzahl andeuten.
 Oben ist das Projekt der Kurven in der X-Y Ebene
 hervorgehoben /nach FEHÉR/.

Bei den Klimabedingungen in Ungarn sind die Wandlungen der Temperatur und des Wassergehaltes des Bodens im allgemeinen von gegensätzlicher Ausbildung. Im Sommer, da die Temperatur den optimalen Wert erreicht, ist der Wassergehalt des Bodens niedrig. Oder sollte er bei einem stärkeren Niederschlag vorübergehend höher sein, so wird die optimale Ausbildung der biologischen Aktivität durch die höhere Temperatur infolge des Wärmeentzuges durch Verdunstung wieder gehemmt.

Dieser für unsere Klimazone bezeichnende Gegensatzlichkeit tritt wegen der Expositionen von hohem Werte in den Dolinen in noch erhöhtem Masse in Erscheinung. Deshalb wird es im Boden der rasch und stark erwärmenden, östlich und südlich exponierten Dolinenhänge derartige kürzere Perioden geben, wobei die nahe optimalen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen der biologischen Aktivität auftreten /kräftige Insolationen nach Sommerregen in der Nacht oder am frühen Morgen/. Zu solcher Zeit erreichen der plötzliche Anstieg der Bakterienanzahl und die Erhöhung der damit einhergehenden CO_2 -Erzeugung im Boden sprunghafte Höchstwerte. Im allgemeinen aber werden die Einwirkungen der höheren Wärmebeträge durch die oft lang andauernde kräftige Austrocknung des Bodens im Sommer für die Lebensbedingungen der Mikroorganismen ungünstig beeinflusst, und deshalb wird an solchen Gehängen mit extremen Amplituden der Erwärmung und Bodenfeuchtigkeit über die weitgehenden Ausschwünge der biologischen Aktivität auch der Intensitätsverlauf der Karstkorrosion weitbegrenzte Schwankungen aufweisen.

Dagegen gibt es bei den Böden der nördlich und westlich exponierten Dolinenhängen - wie gesehen - weder in bezug auf ihre Temperaturveränderungen, noch auf ihnen

Feuchtigkeitsgehalt keine Extremitäten von ähnlichem Ausmass. Der im allgemeinen niedrigere, doch gleichmässigerer Temperaturgang und der bedeutendere Bodenfeuchtigkeitsgehalt gewähren einen von Fall zu Fall unterschiedlichen Grad aufweisenden, doch unbedingt ausgeglicheneren Horizont für die Bodenmikroorganismen. In impliziter Form haben wir damit bereits auf die vielleicht entscheidendsten Ursachen der die Bodenwässer der untersuchten Expositionen bezeichnenden weniger schwankenden, aber geringerer Korrosionsfähigkeit hingewiesen.

Im Zusammenhang damit ist es zu bemerken, dass R. WAGNER hinsichtlich der aus den Expositionsunterschieden der Dolinenhänge stammenden morphogenetischen Wirkung einerseits die Faktoren der Gesteinsverwitterung durch erhöhte Insolation der rasch erwärmenden O-exponierten felsigen Hänge, andererseits die physischen Verwitterungsfaktoren der durch Dilatationsbewegungen erfolgten intensiveren lithoklasenbildenden Möglichkeiten betont. Zum Beweis der als sehr reell erscheinenden Vorstellung sind aber an den aus Kalkstein bestehenden Dolinenhängen bisher keine konkreten Untersuchungen durchgeführt worden, deshalb soll seine Ansicht hinsichtlich der Grössenordnung in der morphologischen Durchsetzung des Faktors vorläufig noch als Arbeitshypothese betrachtet werden.

Natürlich sind die behandelten mikroklimatischen Expositions-kennzeichen in einer Doline nicht nur die quantitativen und qualitativen Determinanten ersten Ranges des Phytoedaphons, sondern sie begünstigen ständig auch die Struktur der Makroflora. Es sind z. B. im Bükkgebirge /Mosszubérc, Kismező, Nagymező/ oder im

Karstgebiet von Nord-Borsod /Verötető usw./ an den südexp-
ponierten /in der Regel felsigen/ Gehängen der waldlosen
Dolinen an waldsteppigen Arten reiche Steppenwiesen /Fes-
tucetum sulcatae/, dagegen an den Ost- und Westhängen und
im allgemeinen auch an den Rändern /falls der Boden/ nicht
tiefgründig ist/ mesophile Bergwiesen /Festucetum ovinæ/
zu finden, während an den N-Hängen entweder die vorigen
oder Haselsträucher /wenn sie felsiger sind: Coryletum
avellanae/, an den nördlichen flachen Schultern mit
tiefgründigen Böden oder an den Dolinesohlen mit mächtige-
ren Böden Borstgrasrasen /Nardetum strictae/ vorkommen.
Wenn der Hangfluss der Doline felsig oder trichterförmig
ist, so kann dort die Vegetation mit Hochstauden /mit Ar-
ten von Eisenhut, Aconitum, Gladiolus usw./ entwickeln
/P. JAKUCS 1961/1-2, 1965/. Diese Pflanzengesellschaften
deuten in den Dolinen an inverse Zonalität an.

Einen solchen Vegetationsumkehr hat sonst auch
GEIGER /1961/ in der Doline Gstettneralm, Niederöster-
reich, ausgewiesen, ferner I. HORVÁT /1953/ in den Do-
linen des Karstgebirges von Jugoslawien.

Es ist offensichtlich, dass in anderen Vegeta-
tionszonen /Höhenregionen/ andersartige Assoziationen
vorkommen und ganz anders ist die Lage auch in einer
waldbedeckten Doline. Aber die Differenzierung je nach
der Exposition ist auch dabei charakteristisch. Und all
das ist durch die Vermittlung der Pedosphäre von Einfluss
auf die Verkarstung unter dem Boden, denn der gegen den
Boden erhobene Anspruch der verschiedenen Pflanzenarten,
sowie ihre Wirkung, die sie auf die Entwicklung den che-
mischen, den Mikroorganismus betreffenden, den Feuch-
tigkeits-, Durchlüftungs- usw. Zustand des Bodens
ausüben, sind unterschiedlich.

Diese Zusammenhänge wurden hinsichtlich der Assoziationstypen der an den Karsten lebenden natürlichen Vegetation aus verständlichen Gründen in ihrer Größenordnung noch nicht untersucht, hinsichtlich der Kulturpflanzen und vor allem einiger gewissen Holzarten verfügen wir doch seit langem über die entsprechenden konkreten Ergebnissreien.

In der Tabelle Nr. I stellen wir nach STOKIASA-DOERRELL /1926/ für sechs Kulturpflanzen, ferner für vier Bodenbakterien ihre Kohlendioxidherzeugung mit der Bemerkung dar, dass die erzeugten Kohlensäuremengen dem 1 g Trockenmaterial der Wurzeln, bzw. der Bakterien entsprechen.

Tabelle Nr. I

Pflanze bzw. Bakterium	Kohlensäureherzeugung in 24 Stunden /CO ₂ in mg/
Zuckerrüben	0,3 - 5,4
Gerste	63,2 - 74,6
Weizen	87,6 - 94,8
Roggen	100,7 - 131,0
Hafer	111,5 - 135,4
Buchweizen	212,5 - 274,0
.....	
Clostridium gelatinosum	480
Bact. Hartlebi	600
Azotobacter chroococcum	1270
Bacillus mesentericus	13000

Die Tabelle kann uns gleich darüber überzeugen, dass vom Gesichtspunkt der edaphischen Kohlendioxid-
zeugung aus die Bakterien /und im allgemeinen die Mikroorganismen/ eine viel grössere Bedeutung haben, als die Wurzeln der Pflanzen. Und dass es trotzdem zwischen der Ausbildung der Wurzelkarrenkanäle und gewissen Pflanzenarten der Karstvegetation /z. B. *Nardus stricta*/ eine unverkennbare Verbindung gibt /P. JAKUCS 1956/, muss nach unserer Meinung mit der Erscheinung zusammenhängen, dass in der Wurzelzone der verschiedenen Pflanzen eine Bakterienpopulation unterschiedlicher Art und Anzahl lebt, ja sogar - z. T. in bezeichnender Beziehung damit - auch die Konzentration der lokalen Bodenfeuchtigkeit in der Rhizosphäre /vor allem zur Trockenzeit/ auf entsprechende Pflanzenarten verweist.

Inwieweit diese Verbindung zwischen den pflanzlichen Wurzeln und der im Boden vorliegenden Bakterienanzahl bedeutsam ist, konnten C. THOM und W. HUMFELD /1932/ bereits auch quantitativ bestimmen /Tabelle Nr. II/.

Tabelle Nr. II

	Anzahl der Bak- terien in 1 g Boden	Anzahl der Pilze in 1 g Boden
im wurzellosem Boden	5 500 000	100 000
in der Rhizosphäre im allgemeinen	26 000 000	800 000
in unmittelbarer Nähe der Haarwurzeln	136 000 000	7 000 000

Da die Kohlendioxidproduktion des Bodens weitgehend von der Menge seines Edaphons abhängig ist /FEHER 1954, GEIGER 1961, FEKETE 1952, 1958, STEFANOVITS 1963, FEKETE-HARGITAI-ZSOLDOS 1964, BECK 1968/, ist es auf Grund der oben gesagten fast zwangsläufig, dass es auch in der Kohlendioxidproduktion der Böden von verschiedener Florabedecktheit /und folglich humushaltig/, sowie von unterschiedlichen Vegetationstypen grosse Unterschiede auftreten. Dass es wirklich so ist, wird durch die heute schon für klassisch angesehenen Beobachtungsangaben bestätigt. Einige von diesen werden in unserer Tabelle III dargestellt, mit der Bemerkung, dass sich die Beobachtungen zwar nicht auf Karsten beziehen, doch gehen auch auf den Karsten die gleichen Tendenzen vorstatten.

Beim Vergleich der vorher angeführten Tabellen I und II miteinander geht es gleich hervor, dass die auf dem Kalkgestein wirkende Korrosionsfähigkeit der Wurzeln gewisser Pflanzen /mit dem dazu gehörigen Phytoedaphon/ das Vielfache gegenüber denjenigen Pflanzen sein wird, im demselben Landschaftsteil /z. B. in einer Doline/ leben, deren Rhizosphäre aber eine sowohl quantitativ als auch qualitativ unterschiedliche Bakteriensymbiose verlangt. So können wir auf die Frage, die wir am Anfang der vorliegenden Arbeit stellten, d. h. welche die kleinsten Ordnungseinheiten der physisch-geographischen Landschaft wären, bei denen die Intensitätsstufen bewirkenden mikroklimagenetischen Differenzen noch in Form zum Ausdruck kommen dürften, nur die einzige Antwort geben, dass es solche kleinsten Grössenordnungen durchaus nicht gibt.

Tabelle Nr. III

Kohlendioxidproduktion einzelner Bodenarten

/nach STOKIASA-ERNEST/

Bodenart	Tiefe	CO ₂ -Erzeugung von 1 kg bei 20° C in 24 Stunden in mg
Lehm	Oberboden	49,7
Lehm	Unterboden	7,6
kalkhaltiger Boden	Oberboden	18,5
kalkhaltiger Boden	Unterboden	9,8
Moorboden	Oberboden	41,2
Waldboden	Oberboden	36,4
Waldboden /humusarm/	25 cm	9 - 12
Waldboden /humusreich/	25 cm	20 - 26
Weide	25 cm	10 - 16
unfruchtbarer, hu- musarmer Boden	25 cm	8 - 14
guter Roggen- und Weizenboden	25 cm	30 - 48
guter Kleeboden	25 cm	53 - 60

Und zwar gibt es solche darum nicht, weil bei der Verkarstung unterhalb des Bodens, wo die sonst die Arealität gewährenden üblichen oberflächlichen Planationsvorgänge /Wind-, Wassererosion usw./ nicht zur Geltung kommen können, noch auch innerhalb des kleinsten Landschaftsteils unzählige winzige Flecken von unterschiedlicher

Denudationsdynamik in unmittelbarem Nebeneinander vorhanden sind. Diese haben eine Grössenordnung manchmal von einem Quadratmeter, andersmal Quadratdezimeter oder sogar Quadratmillimeter. In diesen sich nach den Unterschieden des Korrosionsgrades differenzierenden Kleinsträumen manchmal sogar von infinitesimalem Masse entwickeln sich eigenartige entsprechende Lösungsmikroformen, die in ihrer Gesamtheit dann die herkömmlichen Formentypen der Karstmorphologie gestalten, so wie das Karrenfeld, die Doline usw. sind.

Es wäre natürlich vollständig verfehlt, aus all diesem eine Folgerung zu ziehen, als wenn die Ausbildung, Gepräge und Anordnung der Mikroformen an einem Karst und nur durch die statistische Summierung der Teilvorgänge der Makrofazies entstehen sollte. In der Tat wirkt nämlich die reversible Bedingtheit auch im umgekehrten Sinne: das zonale Makroklima der Landschaft, ihr lithologisches Gepräge, ihre topographischen, tektonischen, hydrographischen usw. Varianzen bestimmen die Merkmale des Mikroklimas und der Assoziationseinheiten, die Verhältnisse und Anordnungen ihrer vorkommenden Typen. Das heisst, die Anfangsprozesse selbst gehen zwar in den Mosaiken der Mikroräume vor sich, aber diese Mosaiken passen sich in ein oder mehrere grössere Systeme ein, für die Grundzüge /dessen oder/ derer Systeme aber nicht mehr die mathematische Summierung der Teilprozesse der Mosaiken bezeichnend ist.

Untersuchungsmethodik des CO₂-Gehalts
des Gasgemenges der Mikrobodenräume

Wir haben erfahren, dass die, unsere Probleme am meisten annähernden Untersuchungen nicht von den Forschungsthemen der Geomorphologen, noch weniger der Karstmorphologen herrühren, sondern in erster Linie landwirtschaftliche, bzw. pedologische und biologische Ansätze haben. Es ist also natürlich, dass sich auch die Angaben nicht auf die ungestörten Böden- und Vegetationsvorgänge, auf deren CO₂-erzeugende Korrekturen beziehen, sondern vor allem auf Nutzpflanzen konkretisiert sind. Auch manche in der karstgenetischen Literatur vorkommenden Hinweise /TROMBE 1951/2, 1952, 1956, SMYK-DRYZAL 1964, usw./ gründen sich nur auf einigen Messungen, oder aber verallgemeinern die von anderen Pedofazies stammenden Beobachtungen der bodenkundlichen Literatur. Und obwohl das Stützen auf diese Analogie - bis wir uns nicht auf konkrete Messungsreihen im Gelände verlassen können - von sich selbst versteht, ja sogar annähernd gute Ergebnisse liefern kann, mussten wir doch danach streben, das Problem auf Grund der sich selbst auf das Problem beziehenden Forschungen beantworten zu können.

Das war aber keine leichte Aufgabe und unsere angesetzten Untersuchungsreihen sind noch bei weitem nicht beendet. Eine besondere Schwierigkeit bereitete vor allem, dass wir uns gezwungen sahen, selbst auch

die entsprechende Forschungsmethodik zu finden. Die gegenwärtig gebräuchlichen die Bodenatmung registrierenden und die Analysis der Bodenatmosphäre ermöglichenden Methoden waren nämlich in unserem Falle nicht zweckmässig.

Wie bekannt, erfolgt die Bestimmung des CO_2 -Anteils der Bodenluft im allgemeinen derartig, dass man aus dem ungestörten Boden mit Hilfe entsprechender Einrichtung /meist mit einem scharfkantigen Metallzylinder von 1 l Rauminhalt/ eine Probe nimmt, dann verdrängt man aus der mit dem Ausschliessen des Luftaustausches ins Labor transportierten Probe mit Wasser oder mit einer Salzlösung von 10 % die Bodenluft und sammelt mit einem Trichter die Luftblasen. Die so ausgewonnene Bodenluft wird dann im Rauchanalysierenden ORSAT-Gerät durch Absorbieren von Kalilauglösung oder durch die Bariumhydroxid-Methode /Titration mit Salzsäure/ von GORBUNOV auf CO_2 -Gehalt untersucht /BOROJEV-JEGOROW-KISELJEV 1951, di GLIERIA-KLIMES-SMYK-DVORACSEK 1957, BALLENEGGER-di GLIERIA 1962/.

Wenn man das Mass der Kohlendioxid-erzeugung des Bodens in der Zeiteinheit feststellen will, so wird sich der Gang der Untersuchung insofern verändern, dass man im Labor durch die Bodenproben mit langsamer Strömung Luft durchfliessen lässt, deren Kohlendioxid-Anteil sowohl beim Eintritt, als auch beim Austritt gemessen /auf Absorptionswege, durch Volumen- oder Gewichtsanalyse, bzw. Titrieranalyse/ und den Unterschied der beiden in CO_2 -Gehalt umgerechnet, auf die Menge und die Messungszeit des im Versuch verwendeten Bodens bezogen wird.

Nach einem anderen Verfahren drückt man in den Boden eine für diesen Zweck ausgebildete, seitens und oben geschlossene Metallglocke, in der die unter natürlichen Bedingungen ausgeatmete Luft aufgefangen wird, dann wird die Glocke mit einem entsprechenden Gerät /z. B. LUNDEGARDH-Gerät/ in Verbindung gebracht, und die durch $\text{Ba}/\text{OH}/_2$ absorbierte CO_2 -Menge mit Hilfe der bereits erwähnten Salzsäure-Titrationsmethode errechnet /BALLENEGGER 1953, FEHÉR 1954/.

Wir haben unsere ersten Untersuchungen über den CO_2 -Gehalt der Böden an der Karstoberfläche auch mit Hilfe der oben angeführten Methode durchgeführt, aber wir wurden im Laufe der Erfahrungen wegen des grossen Zeit- und Laboraufwandes der erwähnten Verfahren dazu gezwungen, eine raschere und am Standort durchführbare Messmethode auszuarbeiten. Das wurde sonst über dem Streben nach besserem Zeitaufwand hinaus auch von anderen Gesichtspunkten aus begründet. Wir haben nämlich beobachtet, dass es hinsichtlich des CO_2 -Gehaltes der Bodenluft nicht gleichgültig ist, wieviel Zeit von der Probenentnahme an bis zum Beginn der Bearbeitungen im Labor vergeht. Von den gleichzeitig und an benachbarten Stellen, unterhalb einer einheitlichen Vegetation entnommenen Bodenproben von gleicher Beschaffenheit haben wir immer in derjenigen einen erheblich höheren CO_2 -Gehalt gefunden, deren Luftverdrängung wir erst später begonnen haben. Das ist sonst verständlich, denn in der hermetisch geschlossenen Bodenprobe wird das Aufhören der biovegetativen und anderen Oxidationsvorgänge ja durch nichts bis zum Vorliegen eines ausreichenden atmosphärischen Sauerstoffvorrats begründet. Und bei massenhaften Untersuchungen, wobei das wichtigste ge-

rade im Vergleich liegt, bedeutet dieser Umstand beinahe die Unnutzbarkeit der Methode.

Und wollten wir das Ausmass der Bodenatmung messen, vermehrten sich die Probleme weiter. Eine derartige Ermittlung ist nämlich, wie das aus der Natur der Sache folgt, so zeitaufwendig /nach der angewandten Methode braucht man mindestens 5 bis 10 Stunden Beobachtungszeit im Labor oder im Gelände zur Aufnahme einer einzigen Angabe/, dass wir nicht einmal auf diese Weise statistisch auswertbare Datenreihen gewinnen konnten.

Nachdem wir im Sinne unserer Zielsetzung das Ausmass des CO_2 -Gehaltes der Bodenräume an benachbarten Karstoberflächen von unterschiedlichem Mikroklima vor allem in ihrer Gleichzeitigkeit vergleichen mussten, wurde es wirklich unvermeidlich, eine schnelle und am Standort durchführbare Messmethode zu experimentieren. Zu diesem Zweck haben wir zwei Verfahren ausgearbeitet, deren kurze Beschreibung wir - aus Mangel an einer früheren entsprechenden Publikation - im folgenden angeben.

Methode I. Das Ansaugen der Bodengase erfolgt durch eine dünne Messingsonde mit einem Durchmesser von 5 mm und am Ende mit perforierter Wand, die in den gewünschten Bodenhorizont einfach einzustecken ist. Es ist zu bemerken, dass das untere Ende der ungefähr 40 cm langen Sonde in einer Konusspitze endet und ein - dem Durchmesser des Rohrlinners gleich dicker - Stahlstab darin eingebracht werden kann. Diesen Stab lassen wir bei seinem Eindringen in den Boden in der

Sonde liegen und erst vor dem Ansaugen der Probe soll er daraus gezogen werden. Der spaltenfrei anpassende Stahleinsatz dient einmal zur Versteifung des dünnwandigen Rohres während seiner Einführung in den Boden, zum anderen um zu vermeiden, dass die Bodenkörnchen durch die Öffnungen in die Sonde gelangen, insbesondere aber die vorzeitige Ausströmung der Bodenluft und die Möglichkeit der Beimengung von fremder Luft auszuschalten.

Anschliessend an das Einstecken der Sonde machen wir die Bodenoberfläche in einigen der Flächen ringsum des Stichpunktes luftundurchdringlich, was z. B. durch den Aufsatz eines dichten Ölfilms /z. B. gebrauchten Öls/ erfolgen kann. /Bei sehr porösen, krumeligen Böden ist es zweckmässigerer, geschmolzenes Paraffin oder Stearin anzuwenden./ Wir lassen die Bodenluft durch einen für diesen Zweck hergestellten und an das über dem Boden befindliche Sondenende anschliessende, durch Feder oder Schwachstrom /Taschenlampenbatterie ernährten/ Motor ansaugen und führen in den an die Luftaustrittsstelle angeschlossenen Gummiballon /eventuell in eine Ballblase/ /Abb. 5/.

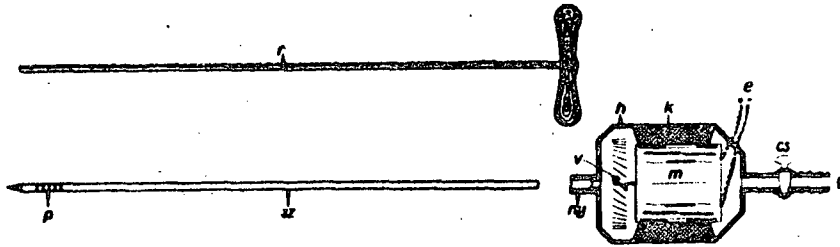


Abbildung 5. Prinzip der Bodensonde zum Ansaugen der Bodengase /original/.

- sz = dünnwandiges Sondenrohr zum Gasansaugen,
- p = Perforation in der Rohrwand,
- ny = luftdichte Anschlussmuffe des Pumpenkörpers,
- v = Luftturbinenrad mit 16 Schaufeln,
- m = Schwachstrommotor /12 V/ /z. B. Motor des Scheibenwischers des Kraftwagens/,
- k = motorhaltende Konsolen,
- e = luftdichte isolierte Anschlussstellen der Energiezuführungsleitungen,
- h = Decke des Pumpenhauses,
- cs = Sperrhahn,
- g = Anschlussstelle des Gummischlauchs,
- z = Versteifungsgestänge.

Nach der Entnahme von etwa anderthalb dl Menge Bodenluft /sie wird abhängig von der Luftdurchdringlichkeit des Bodens in 10 bis 150 Minuten ausgeschieden/ schließen wir den Gummischlauch an die durch eine Druckpinzette verschlossene ORSAT-Gerät an, die wir mit der ersten Luftefüllung durchspülen, dann titrieren wir die zweite

Gaserfüllung durch eine Kalilauge-Absorptionslösung auf Gasvolumen. /Abb. 6/.



Abb. 6. Untersuchung der Bodenluft durch die Methode I auf dem Bükk-Plateau. In der rechten Hälfte des Bildes ist der ORSAT-Gasanalysator, in der linken die in den Boden eingesetzte Sonde mit dem angeschlossenen Saugkopf und dem Gummischlauch zu sehen.

Durch die Methode, die wir 1965 zuerst angewendet haben, kann eine Person je Stunde 4 bis 5 Untersuchungen am Standort durchführen. Wollen wir die Messung an einem späteren Zeitpunkt /z. B. am nächsten Tage/ wiederholen, ist es zweckmässig mit mehreren Sonden zu arbeiten und die eingesetzte Sonde zur Zeit der Wiederholungen im Boden liegen lassen.

In den Jahren 1955 und 1956 haben wir mit diesem Verfahren in fast sämtlichen Karstgebirgstteilen Ungarns /Nord-Borsoder Karst, Bükk, Pilis, Gerecse, Bakony, Mecsek, ja sogar im Soproner Becken: in Fertőrákos/ auch Serienmessungen durchgeführt. Auf Grund der Aufnahme von 300 Beobachtungen mussten wir sehen, dass obwohl die CO_2 -Sättigung der Porengase der einzelnen Böden und Horizonte manchmal auch innerhalb kleiner Abstände bedeutsame /von mehreren Prozenten/ Unterschiede vorliegen, ja sogar auch der Bodenluftraum an der gleichen Beobachtungsstelle Veränderungen von grosser Amplitude /in Abhängigkeit der Tageszeit und anderer Faktoren/, manchmal recht schnelle Konzentrationsveränderungen haben, liefern unsere Angaben zur Ermittlung der Regelmässigkeiten, noch immer nicht hinreichende Kenntnisse.

Was die Ursache betrifft, dachten wir daran, dass die Beimischung der im Luftpumpengehäuse vorhandenen natürlichen Luft die Genauigkeit der Ergebnisse stören kann. Das war zweifellos ein ergebnismodifizierender Umstand, aber das ist gleichzeitig auch wahr, dass zu jeder Probe der gleiche Anteil /etwa 30 mm/ Normalluft beigegeben wurde, so wurden also nur die Werte von absoluter Grösse und nicht die Proportionen modifiziert.

Der Anspruch auf Vervollständigung der Methode war aber auch von einer anderen Seite her begründet. Das zur Analyse unvermeidlich notwendige etwa 150 ml Bodengas schied sich in der depressiven Linse mit verschiedenem Durchmesser aus dem das perforierte Sondenende umgebenden Boden aus, und die Ausdehnung und Form dieser Linse waren von den Porositätskennwerten, von Feuchtigkeitsgehalt usw. abhängig, d. h. sie bildeten einen unbekannten Faktor. Deswegen war vor allem die spezifische CO_2 -Erzeugung der Rhizosphären der benachbarten Pflanzenarten durch unsere Methode nicht erfolgreich zu untersuchen.

Um die oben angeführten Probleme zu überwinden, mussten wir also eine Methodik für Mikroanalysis ausarbeiten, wodurch die genaue Analysis sogar von wesentlich geringfügiger Gasmenge durchgeführt werden kann. In diesem Falle kann nämlich die am vorgesehenen Standort orientierte Gewinnung des Geringfügigen Gases schon viel besser gewährleistet werden. Die Lösung dazu haben wir 1967 durch unten das dargestellte Verfahren Nr. II gefunden.

Methoden II. Die Menge der zur Analyse notwendigen Bodenluftprobe ist insgesamt etwa 5 ml. Man entnimmt diese Gasmenge mit der PRAVAZ-Spritze vom beliebigen Punkt des Bodens. /Es ist angebracht, die vollständige Abdichtung des Kolbens der Spritze oben durch Paraffinnölung zu übersichern! / Nach dem Einstechen der Injektionsspritze, deren Länge der zu untersuchenden Bodentiefe entsprechend gewählt wurde, scheint es auch hier zweckmässig zu sein, die Bodenoberfläche in einem mit etwa 20 cm, Durchmesser Flecken abzudichten. Es ist noch zu bemerken, dass beim Einsetzen der Spritze in den Boden, der Mandrin darin stecken bleiben soll, den wir erst unmittelbar von dem Anschliessen an die Spritze zurückziehen.

Das Ansaugen von 5 ml Bodenluft - wenn nur der Boden nicht ausgesprochen undurchlässiger Ton oder nicht staunässig ist - bereitet nach unseren Erfahrungen im allgemeinen keine Schwierigkeit und auch der Durchmesser der herbeigeführten Gasdepressionslinse beträgt nicht mehr als einige cm. So ist das Ansaugen den durch die Zielsetzung bestimmten Wünschen völlig entsprechend, es lokalisiert sich auf eine gut zu bezeichnende Bodensphäre /z. B. auf die Wurzelzone eines einzigen Grashaufen/.

Die entnommene Luftprobe wird mit der in Abb. 7 dargestellten Apparatur durchgeführt wie folgt.

In das durch einen breit durchbohrten Glasschliffhahn /B/ in zwei Teile /A und C/ gegliederte Reagenzglas /den D Gummistopfen entfernt/ giesst man Kalilauglösung bei geöffnetem Hahn derart, dass sie in den A-Teil und das Bohrloch des Gasstopfens luftblasenfrei erfüllt. /Verdünnungsverhältnis: 1 Teil KOH, 2 Teile H₂O./ Nach Abschiessen des Sperrhahns wird die im C-Teil übriggebliebene Kalilauge ausgegossen und dieser Gefässteil nach Durchwaschung unter mehrmaliger sorgfältiger Abspülung entlaugt. Den C-Teil des auf solche Weise vorbereiteten Reagenzglases mit einer zweckmässig rot oder dunkelblau gefärbten 10 % NaCl-Lösung völlig erfüllt, stellt man, die Öffnung nach unten, in eine die gleiche Lösung enthaltende flache Glaswanne. In dieser Lage lässt man darin aus dem Gasgehalt der PRAVAZ-Spritze von unter her soweit Gas aufbrausen, bis das Gas die gefärbte Lösung bis zum an der Seite der C.Gefässtells angebrachten 5 ml-Strich verdrängt. Danach stopft man das Reagenzglas - dessen Mündung noch immer unter dem Flüssigkeitsspiegel haltend - mit dem D Gummistopfen ein.

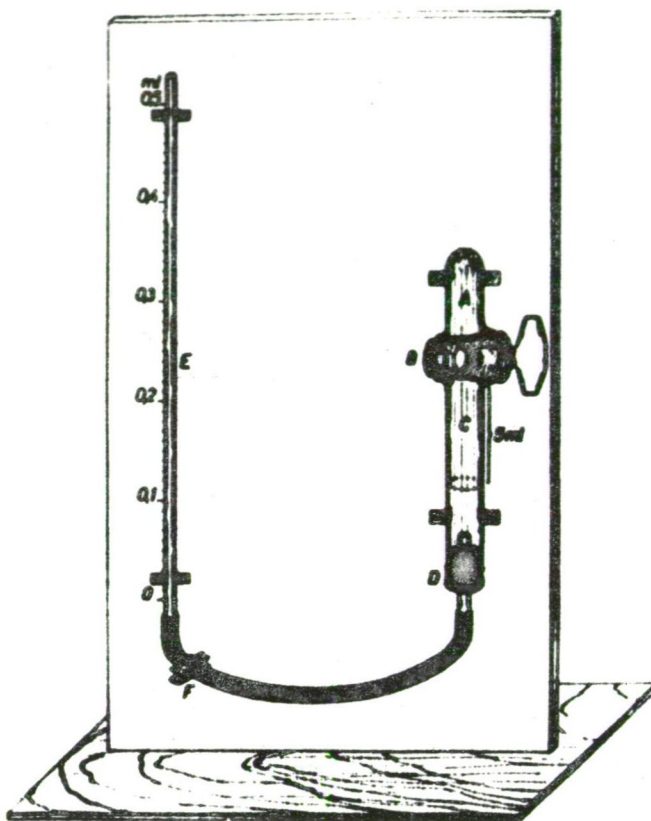


Abb. 7. Prinzip des Mikro-Gasanalysators mit Kapillarrohrregister /original/

A = Kalilauge-Reservoir, B = Glasschliffhahn mit breitem Bohrloch, C = aus einem 5 ml kalibrierten Oberteil und einem unkalibrierten Halsteil mit Stopfeneinsatz bestehenden Reagenzkammer, D = einwegiger Gummistopfen mit Glasrohereinlage und Ausleitungsanschluss an den Verbindungsgummischlauch, E = am oberen Ende offenes Kapillarrohr mit Skala für das Ablesen der Beobachtungen F = Klemme

Es sei bemerkt, dass das Innere des Bohrlochs im Gummistopfen, sowie des zu dem mit Skalaeinteilung versehenen Kapillarrohr /E/ Anschluss gewährenden Glas- bzw. Gummischlauch auch mit der erwähnten NaCl Farblösung gefüllt werden soll.

Nach Durchführung des Anschlusses der beiden Teile der Einrichtung befestigen wir unsere Apparatur - von aussen her abgetrocknet - auf ein entsprechendes Gestell in der Abb. 7 dargestellten Lage, dann den F Sperrhahn geöffnet, drücken wir den D Gummistopfen ein wenig mehr hinein, damit der dadurch im C-Raum entstandene schwache Überdruck in einem E Rohr eine Flüssigkeitsfaden voll hinauftreibt. Den am oberen Ende eventuell auftretenden Überlauf trocknet man mit Löschpapier ab und nachdem im Kapillarrohr das obere Ende des Flüssigkeitsfadens stillgestanden hat /das kann manchmal wegen der temperaturbedingten Volumenausgleich sogar 1 bis 2 Minuten in Anspruch nehmen/, notieren wir dessen Meniskus. Nun wird der H Hahn so gestellt, dass die Verbindung zwischen A und C Räume hergestellt ist. Die Kalilauge fließt vom Raum A zum Raum C hin, und vom C wandert das Gas z. T. zum A über. Inzwischen wird der CO_2 -Komponent der Gasmenge absorbiert. D. H. nun wird das Volumen der in den Gefäßteilen A + C befindlichen sämtlichen gasförmigen und flüssigen Zustandsphasen im Verhältnis zum Gesamtvolumen des vor dem Öffnen des Hahnes separaten A + C Raumes genau um den Gasvolumen-Anteil des CO_2 -Komponenten der Gasmenge geringer. Dem Aufhören des CO_2 Partialdruckes entsprechend sinkt also der Flüssigkeitsspiegel im Kapillarrohr ab.

Wenden wir nun ein Kapillarglas an, bei dem 0,5 ml Flüssigkeit in 50 cm Länge den inneren Raum des Rohres erfüllt, wird jedem Prozent CO_2 ein Absinken von 5 cm des Meniskus entsprechen. In diesem Falle also, da eine Meniskussenkung von halb mm noch beobachtbar ist, wir unsere Apparatur mit 0,01 % Empfindlichkeit für die Messung eines maximalen Kohlensäuregehaltes von 10 % zum unmittelbaren Ablesen jeder Zwischenstufe geeignet. Man kann natürlich je nach dem Kaliber und der Länge des Kapillarrohrs ein mehr oder weniger empfindliche Beobachtungsskala anfertigen.

Bei Durchführung der Messungen muss man doch einem einzigen Gesichtspunkt besondere Aufmerksamkeit schenken: Die Einrichtung reagiert empfindlich auch auf die kleinste Temperaturveränderung. Deswegen darf man damit nur im Schatten arbeiten und man muss den die Reagenten enthaltenden Gefässteil nur mit einer Holzpinzette angreifen, vor der Hand- und Atmungswärme schützen.

Die Anwendung unseres Verfahrens ergibt bei hinreichender Übung sehr schnelle und genaue Ergebnisse. Mit Hilfe dieses Verfahrens haben wir in 1967 und 1968 etwa 940 Messungen zum kleineren Teil in den ungarischen, zum grösseren in jugoslawischen Karstgebieten durchgeführt. Über deren Ergebnisse, mit Rücksicht darauf, dass unsere Forschungen in diesem Themenkreis erst nach Erfüllung eines weiteren mehrjährigen Aufgabenprogramms zu Ende gebracht werden, geben wir im vorliegenden Aufsatz keine ausführliche Rechenschaft. Doch müssen wir auf einige, heute schon als abgeschlossen zu betrachtende Teilfragen bereits eingehen, da unsere Ergebnisse zum Verständnis der in den Mikroräumen vor sich gehenden Karstkorrosionsvorgänge wichtige Gesichtspunkte liefern.

Beispiele für die Merkmale des CO₂-Haushaltes
in Bodendenatmosphären der karstigen Mikro-
räume mit unterschiedlichen biologischen und
klimatischen Besonderheiten

Schon bei unseren ersten Bodenluftuntersuchungen konnten wir uns darüber überzeugen, dass auf die CO₂-Konzentration der Bodengase bezogen nicht nur die gleichzeitigen und an verschiedenen Stellen durchgeführten Beobachtungen erhebliche Abweichungen in der Grössenordnung zeigen, sondern sogar an derselben Probenentnahmestelle beträchtliche substantielle Differenzen bei der Analyse der in unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben auftreten können. Und zwar handelt es sich hier nicht nur um die in der pedologischen Fachliteratur /z. B. D. FEHÉR 1954/ erörterten, an Jahreszeiten gebunden veränderlichen Konzentrationswandlungen in langer Amplitude, sondern um Proportionsmodifikationen der Gaszusammensetzung in viel kürzeren Perioden und von Bedeutung. In den meisten Fällen kann man nämlich zweimal die gleichen Messergebnisse nicht einmal an derselben Stelle beobachten.^{+/}

Die oben angeführten haben uns also gezwungen, uns nicht mit dem zahlreichen, doch sporadischen Angaben zu befriedigen, sondern einmal nach dem Vergleich von homochro-

^{+/}

Es ist hier zu bemerken, dass es nach unseren Erfahrungen zweckmässig scheint, zwischen zwei nachfolgenden Beobachtungen - bei Anwendung der 5 ml mikroanalytischen Methode - eine Ruhepause von mindestens einer Stunde für die Gasregeneration zu gewähren.

nen, womöglichst vom gesamten Gebiet gewisser Karstformen /z. B. Dolinen/ entnommenen Datenreihen zu streben, zum anderen ein Übersichtsmaterial zu sammeln, an dem sich die Entwicklungstendenzen in mehr oder weniger langes Zeitfolgen einer ausgewählten Beobachtungsstelle widerspiegeln. Deshalb haben wir - insbesondere im Jahr 1968 - Messungsreihen zumeist ganz - oder mehrtägigen Perioden hindurch durchgeführt, wobei die Kontinuität durch eine Beobachtungsdichte von 2 Stunden, in nötigem Falle sogar von 1 Stunde gesichert wurde.

Diese Untersuchungen führten zu ausserordentlich aufschlussreichen, grundsätzlich bedeutsamen Erfahrungen unter anderem in Jugoslawien, in einer Doline des südlich der Stadt Karlovac in Kroatien gelegenen flachen, mit Terra Rossa bedeckten Plateaus. Hier haben wir in den Boden sowohl der N-, als auch der S-exponierten Dolinenhang 2 Nadelsonden eingesetzt, und zwar je eine in 5 cm Bodentiefe und je eine in die 20 cm tiefen Zone. Es ist zu bemerken, dass die ganze Doline von einer ziemlich homogenen Vegetation bedeckt war: der ungefähr 60 bis 80 cm hohe Adlerfarn *Pteridium aquilinum*/. Für die Stationen haben wir in beiden Expositionen Oberflächen mit gleicher Hangneigung /etwa 20°/ gewählt und die Probenentnahmenadel unter je ein *Pteridium* gestochen. Makroskopisch erkennbare Unterschiede der Bodenzusammensetzung haben wir hinsichtlich der Expositionen nicht beobachtet, nur dass der Boden in der N-Exposition /bereits in der 5 cm Tiefe/ wesentlich feuchter war. Wegen Mangel an quantitativen Messungsmöglichkeiten können wir uns hinsichtlich der letzteren nur auf Schätzungen beschränken./

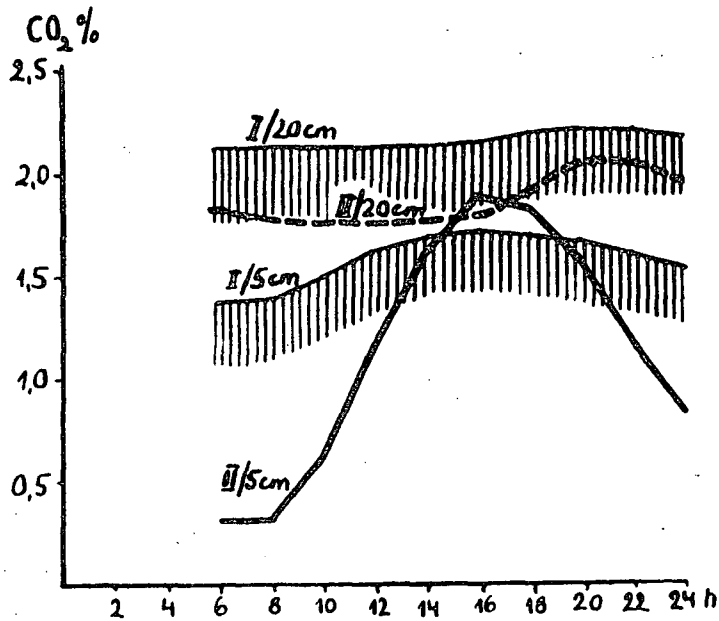


Abb. 8. Veränderungen im Laufe von 18 Stunden des CO₂-Gehaltes der Bodenluft, entnommen von den 5 und 20 cm Horizonten unter einem gut entwickelten Pteridium aquilinum an einem klaren, windstillen Sommertag /14. 7. 1968/. Die Aufnahmereihe wurde in einer Doline Kroatiens /etwa 12 km weit südlich von Karlovac entfernt an der nach Plitvice verlaufenden Landstrasse/gelegenen/ an N- /I/ und S-exponierten /II/, ca. 20° geneigten Hängen, auf Grund einer Beobachtungsreihe von 2 Stunden. Bodenart: 20 cm vorherrschend rotlehmer Rendzina, im 5 cm Horizont mullförmiger humoser Oberboden mit Krümelgefüge /original/.

Am ersten Untersuchungstag /14. 7. 1968/, wobei es den ganzen Tag hindurch warm, klar und windstill war, sind die Veränderungen des CO_2 -Gehaltes der Bodengase in Abb. 8 dargestellt.

Aus den auf die einzelnen Punkte und Horizonte bezogenen täglichen Konzentrationskurven ergeben sich die nachstehenden Feststellungen, die - da bisher keine Messergebnisse entgegengesetzten Sinnes von anderswo erhalten sind - vielleicht bereits jetzt in verallgemeinerter Form abgefasst werden können.

1. Der CO_2 -Gehalt der Bodenluft hat - an den mit Vegetation bedeckten Karstoberflächen - in den untersuchten Expositionen und bis zur untersuchten 20 cm Tiefe in jeder Schicht einen Tagesgang, der sich der Wärmemengenkurve des Bodens empfindlich und in annähernd geradem Verhältnis anpasst.

2. In der S-Exposition sowohl im Bodenhorizont von 5 cm, als auch in dem von 20 cm schwankt die Konzentration des Gases mit extremeren Amplituden, als in den N-Expositionen.

3. In beiden Untersuchungsschichten des Oberbodens bleibt der CO_2 -Anteil der Gasmenge - hinsichtlich des Tagesdurchschnitts - unter dem der N-Exposition. /Wie wir später sehen werden, trifft dieser Punkt nur dann zu, wenn der Boden in der Südexposition trocken, während in der Nordexposition feuchter ist./

4. In der 20 cm Bodenzone ist die Gaskonzentration meistens höher, als in der 5 cm Zone. /Im späteren werden wird auch in bezug auf diesen Satz beweisen, dass er nur in dem Falle zutrifft, wenn die obere Bodensphäre wesentlich trockener ist, als die darunter liegende./

Das Wesen der im Punkt 1. einerseits und in den Punkten 3. und 4. andererseits gezogenen Folgerungen miteinander verglichen soll die Abfassung der vorstehenden Ansprachen ohne Zweifel eine Art Antagonismus enthalten. Denn, wenn der CO_2 -Anteil der Bodenluft mit der Wärmemenge tatsächlich im Zusammenhang des geraden Verhältnisses steht, können wir mit Recht erwarten, dass auch die CO_2 -Konzentration des Bodengases an den S-exponierten, einen höheren Betrag von Insulationskalorie anhabenden Hängen, ferner in den sich stärker erwärmenden 5 cm-Bodenzonen ausgeprägter wird. Im gegebenen Falle müssen aber auch zwei Bedingungen beachtet werden, die die biostimulative Wirkung der Wärmemenge bzw. deren reale Wider Spiegelung am Anteil des Kohlendioxidgehaltes zerstören. Diese sind einmal die erhebliche Trockenlegung des Bodens der S-exponierten Hänge, zum anderen die mit seiner Trockenlegung im Zusammenhang stehende erhöhte Durchlüftung.

Dass die in der biogenetischen Aktivität /in übertragenem Sinne der CO_2 -Erzeugung/ des Edaphons gespielte Rolle der Bodenfeuchtigkeit durchaus nicht vernachlässigt werden kann, haben wir bereits in Abbildung 4 dargestellt. Welche erhebliche Bedeutung doch in der Beurteilung der Frage dem Durchlüftungsgrad des Porenraumes des Bodens zugeschrieben werden soll, deren Ansprache wurde erst durch die an den folgenden Tagen in der untersuchten Doline Kroatiens aufgenommenen Diagramme ermöglicht. Denn am fraglichen Tag hat die vorherige Windstille aufgehört und die sanften Windstöße übten auf die Gestaltung der Kurven eine sehr beachtenswerte Wirkung aus /s. Abb. 9/ Diese Wirkungen können im wesentlichen wie folgt zusammengefasst werden.

1. Bereits bei schwacher Windgeschwindigkeit nimmt der CO_2 -Gehalt der Bodenluft stark ab.

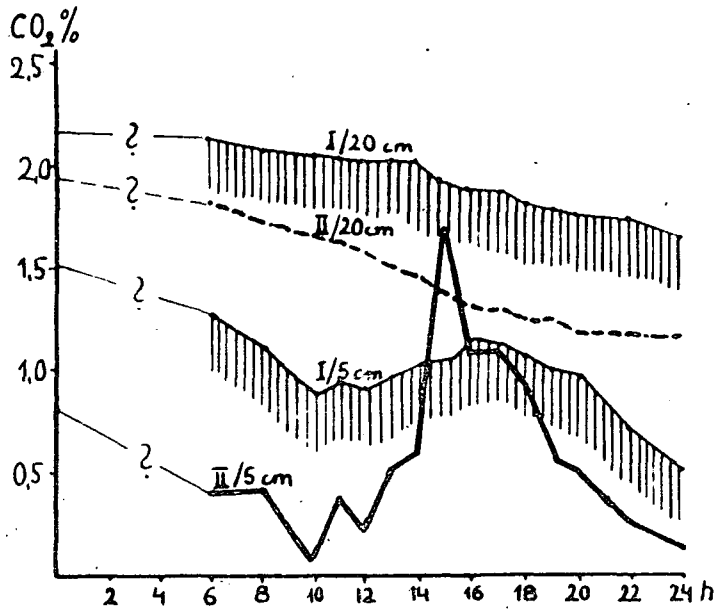


Abb. 9. Veränderungen des CO₂-Gehaltes der Bodenluft an den im Text der vorangehenden Abbildung bereits erwähnten Untersuchungsstellen an einem etwa 60 % klaren und von den Vormittagsstunden an eingesetzten windigen Sommertag /15. 7. 1968/ im Zeitraum von 6 bis 24 Uhr /original/.

2. Diese Abnahme der Gaskonzentration hängt nicht mit dem Verlangsamen der CO₂-Erzeugung im Boden, sondern mit der Erhöhung des gegebenen Gasvorrats, der Austauschdynamik des Porenlufttraumes zusammen. /Darauf kann man schliessen z. B. aus dem Höchstwert der Kurve II/15 von 15 Stunden, dessen in einer kürzeren Windstille ohne Übergang eingesetzte Bildung

erst dann verständlich wird, wenn man annimmt, dass sich die biologische Aktivität des Edaphons in den niedrige Werte verzeichnenden Zeitdauern der früheren Stunden sukzessive erhöhte, aber die Voraussetzungen des *in loco nascendi* Erhaltens der entstandenen gasförmigen Stoffwechselprodukte erst jetzt angegeben wurden. Wir müssen sogar annehmen, dass selbst die aeroben Vorgänge im Boden von den durch den verursachten Luftdurchwaschungen noch günstig beeinflusst werden, und damit werden von der Wirkung der Windstösse wirklich nur die Bedingungen der Gaskonzentration schädlich betroffen.

3. Je feuchter der Boden ist, ist der Gasaustausch durch den Wind ein desto langsamer und mit geringerer Wirksamkeit sich vollziehender Vorgang. Das tritt besonders gut zu Erscheinung beim Vergleich der Diagramme II/5 und I/5. Die so entstandenen Wertunterschiede ergeben wieder, dass der CO_2 -Gehalt der Bodenluft der N-Expositionen auch jetzt in beiden untersuchten Zonen eine höhere durchschnittliche Konzentration hat im Vergleich zu denen der S-exponierten Böden.

4. Die verhältnismässig bedeutsamen doch kurz andauernden Gaskonzentrationserhöhungen des obersten Bodenhorizontes beeinflussen praktisch nicht die Gasmengenentwicklung von abnehmender Tendenz in windigem Wetter der tieferen Horizonte.

Die angefangene Untersuchungsreihe in Kroatien weiter zu führen, wurde durch einen in der Nacht auf den 16-ten Juli erfolgten ergiebigen Niederschlagsfall begründet. Sonst zeigte der CO_2 -Haushalt der Bodenluft sowohl während des Regens, als auch in den nachfolgenden Stunden ausserordentlich interessante Gänge so in der 5 cm-, wie in der 20 cm-Bodentiefe. Die erhaltenen Datenreihen sind in den Vergleichsdiagrammen der Abb. 10 zusammengefasst, woraus die nachstehenden Folgen zu ziehen, liegt völlig auf der Hand.

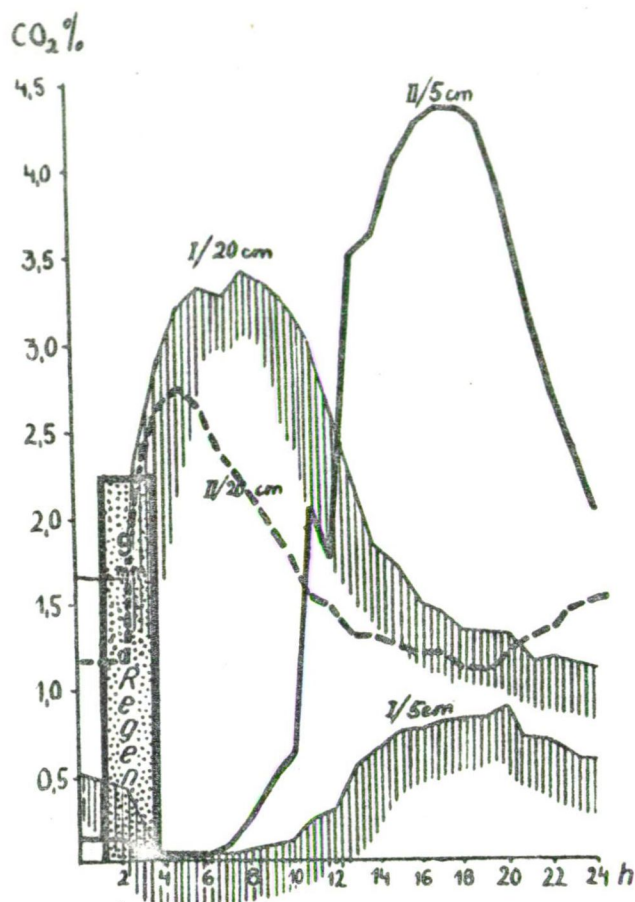


Abb. 10. CO₂-Gehaltsveränderungen der Bodenluft der in den vorhergehenden Abbildungen angedeuteten Untersuchungsstellen in Kroatien, an einem klaren, windstillen Sommertag, der einem Nachtsturm mit 9 mm Regen folgte /16. 7. 1968/. Der Regen, der von 1^h 10 bis 3^h 35 dauerte, war am Anfang intensiv, dann folgten in Wellen aufeinander die sich später noch mehrmals wiederholenden, aber schwächeren Niederschläge mit geringfügigeren Spenden /original/.

1. Der Niederschlag absorbiert in derjenigen obersten Bodenzone, die von seinem versickernden Anteil unmittelbar durchfeuchtet wird /in unserem Falle war die 5 cm-Bodenzone sowohl in der N-, als auch in der S-Exposition/, den Kohlendioxidvorrat des Bodenlufttraumes im wesentlichen bereits im Laufe der Versickerung, d. h. verzehrt ihn praktisch fast völlig.

In den tieferen und von der Versickerung unmittelbar nicht betroffenen Bodenhorizonten fängt der CO_2 -Anteil der Porengase gleich nach dem Niederschlagsfall, sprunghaft zu nehmen und es entwickeln sich, im Vergleich zu den früheren Werten ungewöhnlich hohe Konzentrationswerte. Hier kommt also ein überraschender Umkehrung des CO_2 -Haushaltes der 5 und 20 cm-Bodenhorizonte zustande, die dann wesentlich auch in den späteren Tageszeiten erhalten bleibt /falls eine starke Erwärmung durch Insolation in den Tagesstunden erfolgt/.

Was die Ursache der auffallenden nächtlichen Erscheinung betrifft, können wir nur daran denken, dass die infolge des Regens erfolgte starke Quellung der oberen Bodenschicht und die damit zusammenhängende Luftundurchdringlichkeit die frühere natürliche Durchlüftung der tieferen Bodenhorizonte verhindert, und so werden die Gasprodukte der dort vor sich gehenden Stoffwechselvorgänge durch Moder und sonstige Oxidation angehäuft.

Dass dieser Faktor wirklich die Hauptursache der Erscheinung sein kann, das ergibt sich wohl aus dem Unterschied zwischen den 20 cm-Diagrammen der S- und N-Expositionen. Bei der vor dem Regenfall einen trockeneren Boden aufweisenden S-Exposition /Kurve II/20/ hört nämlich durch die Durchfeuchtung erfolgte Luftabdichtung früher auf /bereits nach 5 Uhr in der Früh/, als im Falle des von vornherein feuchtiger und so bei gleichem Durchfeuchtungsgrad dauerhafter ertrunkenen N-exponierten Bodens /Kurve I/20/, wobei die Abnahme der Gaskonzentration wesentlich erst am Morgen nach 8 Uhr einsetzen kann.

3. Unter Wirkung der indirekten Erwärmung bei Tag durch Insolation und Luftleitung nimmt die CO_2 -Erzeugung der S-exponierten Zone /II/5/ alle frühere räumliche Werte bedeutend übertroffen zu, was in diesem Falle mit der Übereinstimmung des sich im Laufe des Tages entwickelten optimalen Wärme- und Feuchtigkeitsmengen zusammenhängt. Es fällt aber auf, dass der Maximalwert im Vergleich zum üblichen Zeitpunkt der für die II/5 Kurve der vorangegangenen Tage kennzeichnenden oberen Kulminationen mit mehrstündiger Verspätung einstellt, was mit aller Gewissheit mit dem Wärmeentzug durch die am Vormittag stärkere Verdunstung im Zusammenhang steht.

Es ist zu bemerken, dass wir die tendenzwidrigen Verlauf der Kurve zwischen 10 und 11 Uhr nicht erklären können, doch ist es nicht ausgeschlossen, dass darin die Wirkung einer von uns nicht beobachteten kleineren Luftbewegung zum Erscheinen kommt.

4. Die Minderung bei Tag der CO_2 -Konzentration der 20 cm Bodenhorizonte kann besonders in den Tageszeiten, da sie mit der gleichzeitigen Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration der bodennahen Schicht zusammenfällt, schwierig erklärt werden. Die Möglichkeit ist aber nicht auszuschliessen, dass hier die Absorption der inzwischen tiefer nach unten versickerten Bodenfeuchtigkeit eine Rolle spielt.

5. Die nach 19 Uhr ansteigenden Werte des II/20 bezeichneten Diagramms bringen wahrscheinlich bereits die Einwirkungen des hohen CO_2 -Gasgehalts der 5 cm-Schicht zum Ausdruck.

6. Die erheblichen Grössenordnungen beim Anstieg der Nachmittagskurven II/5 und I/5 beweisen, dass die Kohlendioxidherzeugung der sich intensiver erwärmenden Südhangböden unter gleichmässig günstigen Bedingungen der Bodenfeuchtigkeit die mehrfache sein kann, als die der N-exponierten Hangböden.

/Vgl. diesen letzteren Satz mit der Ansprache 3 des Bewertungsteils der Abb. 8/.

7. Unter günstigen Bedingungen der Bodenfeuchtigkeit kann die CO_2 -Konzentration der obersten Bodenhorizonte - vor allem in der S-Exposition - höhere Werte erreichen, als in den tiefer gelegenen Zonen derselben Stellen. /Dieser Satz ist mit der Ansprache 4 des Bewertungsteils der Abbildung 8 zu vergleichen./

Von den an Karstoberflächen in Ungarn in einer waldlosen Doline der Létrástető im Bükkgebirge untergenommenen mehrtägigen Angabenreihen heben wir unsere am 17. und 18. August 1968 durchgeführten Beobachtungen hervor, die auch die Kennwerte des CO_2 -Haushaltes der Bodengase der O- und W-exponierten Hänge neben den N- und S-Expositionen vergleichbar machen und zwar bezogen auf einen mässig windigen, doch sonnigen, warmen und einen darauf folgenden regnerischen, kühleren Tag /Abb.11/.

Damit die aus den Expositionen folgenden Tendenzen der Bodengase durch je weniger Störungsfaktoren beeinflusst werden können, haben wir unsere Stationen auf Hangpartien mit gleichem Neigungswinkeln angesetzt, und die Wurzelzonen der Steppengräser /*Festuca sulcata*/ von gelichen Entwicklungsstand und gleicher Art untersucht. Da wir in der N-Exposition keine gut entwickelte *Festuca sulcata* gefunden haben, haben wir uns in die Rhizosphäre einer *Festuca ovina* mit etwas kleineren Wurzeln gelagert. Die Bodengasproben haben wir an jeder Stelle aus der 5 cm tiefen Schicht entnommen. Es ist noch zu bemerken, dass wir bei der Wahl der Doline auch darauf geachtet haben, unsere Stationen an Stellen annähernd gleicher Bodenmächtigkeit und Bodenbeschaffenheit anzusetzen.

Aus der zweitägigen Untersuchungsreihe ergeben sich folgende Schlüsse:

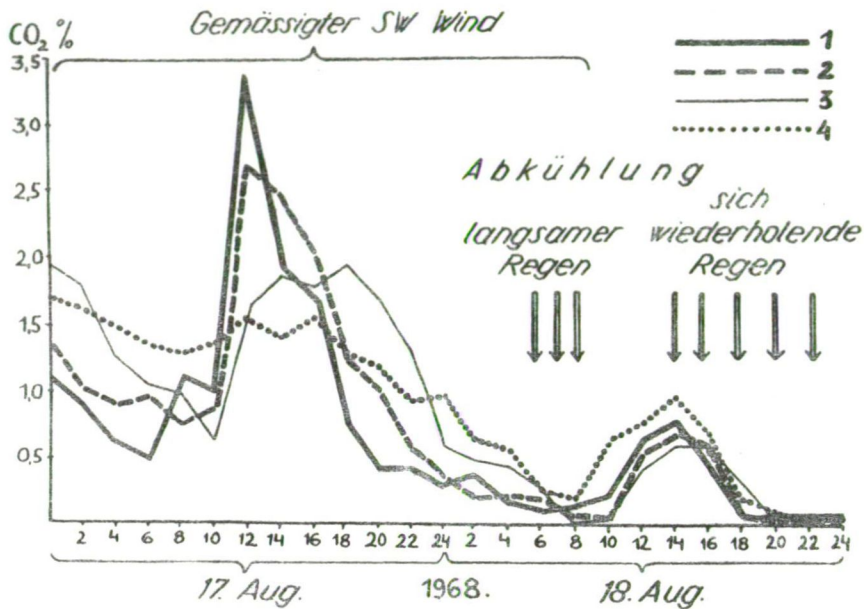


Abb. 11. Beispiel für die Bedeutung der die Verkarstungsintensität beeinflussende Exposition. Veränderungen des CO₂-Gehaltes der Bodengase in den Rhizosphären von *Festucae*, die an den annähernd gleich steilen, aber unterschiedlich exponierten Flanken einer waldlosen Dolien /Létrástető/ des Bükkgebirges an einem warm-sonnigen und an einem darauf folgenden regnerischkühlen Tage. Die Diagramme zum Vergleich der Untersuchungsergebnisse der vom Wurzelballen entnommenen Gasproben wurden auf Grund der Beobachtungsintervallen von 2 Stunden am 17. und 18. August 1968 angefertigt /original/.

- 1 = O-Exposition, *Festuca sulcata*,
- 2 = S-Exposition, *Festuca sulcata*,
- 3 = W-Exposition, *Festuca sulcata*,
- 4 = N-Exposition, *Festuca ovina*.

1. Am 17. August stürzte der SW-Wind /nach den Messungen von WAGNER auf dem Kurtabérc mit dem Stärkegrad 4/ den Tagesgang des CO_2 -Gehaltes im Boden auf dem O-exponierten, also wesentlich windschattigen Hang am wenigsten. Hier haben wir um 12 Uhr einen Kohlendioxidgehalt von 3,35 % /also obere Kulmination/ gemessen, was zur Zeit der Luftbewegung für einen sehr hohen Wert betrachtet wird und ausser dem Strahlungsoptimum vom Vormittag auch mit dem günstigen Bodenfeuchtezustand zusammenhängt. Am Südhang, vielmehr noch in der W-Exposition kulminierte die Konzentrationskurve des Gases niedriger, obwohl am ganzen Tag günstige Strahlungseinwirkungen zur Geltung kommen konnten. Die den Höchstwert dämpfende Wirkung der dynamischen Bodendurchlüftung trat am westlichen Hang am stärksten auf.

2. Zwischen den oberen Kulminationen der Kurven der O- und W-exponierten Böden ist am ersten Untersuchungstag eine Verschiebung von etwa 6 Stunden zu sehen. Eine Verschiebung von solchem Ausmass tritt nur unter Einwirkung der Erwärmung durch direkte Strahlung auf. Am folgenden völlig bewölkten Tag stimmen die oberen Kulminationspunkte der verschiedenen Hänge fast überein.

3. In der direkte Strahlung kaum erhaltenden N-Exposition hat die Windauswehung den die CO_2 -Erzeugung bewirkenden Einfluss der Tageserwärmung durch Luftleitung fast völlig unterdrückt, und so gibt diese Kurve mit fast gleichmässigem Absteigen die für den windigen Tag bezeichnende Tendenz der Gasgehaltabnahme wieder.

/Der Umstand, dass die Untersuchung in der Nacht vom 16. auf 17. August in jeder Exposition eine verhältnismässig grosse CO_2 -Konzentration angibt, hängt mit dem günstigen Strahlungs- und Bodenfeuchtheitswerten vom 16. August, sowie mit der Windstille dieses Tages zusammen, die an diesem Tage an-

nehmbar in jeder Exposition zur Gestaltung sehr hoher Werte der oberen Kalmation führten. Leider können wir diese Annahme wegen Mangel an konkreten Messungen nicht bestätigen./

Obwohl es hinsichtlich des Anteils sämtlicher Wirkungskomponenten analytisch noch nicht hinreichend geklärt ist, das kann doch bereits zweifellos festgestellt werden, dass die CO_2 -Gehaltsunterschiede, die die komplexe Resultante ausserordentlich vieler Wirkungskräfte ausdrücken, expositionsorientiert sind. Die Besonderheiten der Menge und des Tagesganges der Gaserzeugung, deren Vorhandensein in bezug auf die Böden der O- und W-Expositionen auch durch unsere Messergebnisse bereits ermittelt wurden, können nicht selten sogar von solcher Grössenordnung sein, wie die Differenzen gleichen Charakters der S- und N-Expositionen.

ANDÓ /1959/ fand auf den Dämmen der Theiss an einem völlig klaren, windstillen Tag die W-Expositionen im allgemeinen wärmer, und das erklärte er durch den Wärmeeintrag infolge Verdunstung der am Morgen bestrahlten Hänge. Die Analogie zu suchen ist unbedingt begründet, das ist aber nach unserer Meinung nur einer der objektiv wirkenden anderen Faktoren. Für den CO_2 -Gehalt der Dolinenhänge haben wir bisher noch keine derartigen allgemeingültigen Feststellungen geben, denn wir meinen, dass wir noch immer nicht über eine hinreichende Anzahl und auch statistische Auswertungen ermöglichende Datenreihe von den Tagen mit unterschiedlichen Strahlungen, Windverhältnissen und Niederschlagskennwerten verfügen. Unsere bisherigen Angaben unterstützen sonst auch keinen Standpunkt kategorisch, denn im Laufe unserer hier nicht detaillierten Messungen gab es Fälle, wobei die westlichen, aber auch solche wobei die östlichen Expositionen den höheren Betrag der täglichen CO_2 -Erzeugung aufwiesen. Vergleiche diese Frage noch mit den detaillierten Untersuchungsergebnissen der Wärmegänge und der Bodenfeuchtigkeit der Dolinenexpositionen./

Nachdem die CO_2 -Erzeugung im Boden und sein globaler Kohlendioxidgehalt ein entscheidender Faktor für das Aggressivwerden der durchsickernden Niederschlagswässer, und so dadurch auch der wichtigste Determinant des lokalen Ausmasses der Verkarstungsdynamik ist, kann für fast sicher genommen werden, dass z. b. die Ungleichförmigkeit der Dolinen nicht mit den von CHOINOKY und seinen Anhängern angenommenen lithologischen, stratigraphischen /streichens- und fallens-orientierten/ Ursachen, sondern mit den hier dargestellten mikroräumlichen Faktoren in kausaler Verbindung ersten Ranges steht. Nur so kann es vorkommen, dass die in räumlich unterschiedlich angeordneten Kalksteinschichten entstandenen Dolinen in bezug auf ganze Gebirge übereinstimmende Richtungen der Deformationsachse haben, wie das durch unsere im Bükkgelände, im Nord-Borsoder Karst, im Mecsek und auf mehreren Karstplaninen Kroatiens in diesem Sinne durchgeführten Messungen bewiesen wurde.

Sonst haben die verschiedenen Pflanzenindividuen und Assoziationstypen unbedingt ihre artenspezifischen Begebenheiten für das Antreiben der CO_2 -Erzeugung im Boden bzw. die Bestimmung des Ausmasses der Bodendurchlüftung, sogar in bezug auf karstige Pflanzengesellschaften. Auffallend wird das beim Vergleich der Bodengase der Wälder mit den Bodengasen der Steppenwiesen, denn im Boden der Wälder ist die CO_2 -Gasmenge immer beträchtlicher, als die des Bodens der Wiesen ohne hölzernen Gewächse. Dieser Unterschied geht sogar auf mehrere Ursachen zurück. Von ihnen halten wir für die wichtigsten die folgenden:

1. Der Feuchtigkeitsgrad des Waldbodens ist wesentlich günstiger und zeigt kleinere Extremitäten, als der Boden der Steppenwiesen.
2. Der Waldboden ist durch die Laubkrone vom Wind geschützt.

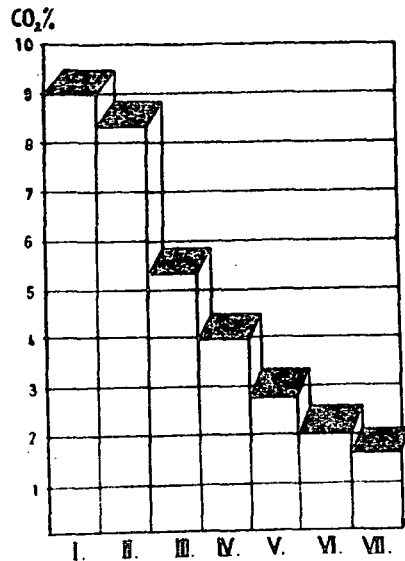


Abb. 12. Vergleichsdiagramm der aus den Rhizosphären verschiedener Pflanzenarten karstiger Steppenassoziationen, sowie aus den 5 und 10 cm tiefen Zonen des Bodens unterschiedlicher Waldtypen gewonnenen Maximalwerte der CO₂-Konzentrationen im Frühjahr. Die Messungen haben wir im Bükkgebirge, bzw. im Nord-Borsoder Karst in den Monaten April und Mai der Jahre 1967 und 1968 an klaren, windstillen Tagen durchgeführt /original/.

Entnahmestellen der Bodenluftproben:

- I = in einem Eichenwald, unter einem mehrere cm mächtigen, zweijährigen, feucht konsistenden Laubrestfaden,
- II = in einem Buchenwald, unter einem mehrere cm mächtigen, zweijährigen, feucht konsistenden Laubrestfaden,
- III = in einem Fichtenwald, unter dem Teppich sich zersetzender Nadelreste, etwa in 8 cm Tiefe,
- IV = aus der Wurzelsphäre der Nardus stricta, vom sauren und tiefgründigen Boden einer Doline auf dem Bükk-Plateau,
- V = aus der Wurzelsphäre der Festuca sulcata in der Steppenwiese einer SO-exponierten Dolinenhangs mit Felsenflecken bei Aggtelek,
- VI = aus der Wurzelsphäre der Festuca ovina in der Steppenwiese eines N-exponierten Dolinenhangs mit Felsenflecken bei Aggtelek,
- VII = unterhalb einer Carex humilis, in 5 cm Bodentiefe, in der Steppenwiese einer SO-exponierten Dolinenhangs bei Aggtelek.

3. Der Waldboden ist zumeist von einer horizontal geschichteten, zusammenhängenden Schicht von Laubresten bedeckt, deren die Durchlüftung hemmende Wirkung beträchtlich sein kann.

4. Die ausgedehnte und tiefreichende Rhizosphäre des hölzernen Gewächses erhöht bedeutend die Tiefe der vom Gesichtspunkt der subcutanen CO_2 -Erzeugung aus wichtigste biologisch aktiven Bodenzone und dadurch die der Einheitsfläche angehörende Anzahl des Edaphons.

In Abb. 12 stellen wir einige kennzeichnende Daten von unseren Beobachtungen dar, an Hand derer wir die oben angeführten Ansprachen abfassen konnten. Es scheint so, dass die vom Gesichtspunkt des Karstprozesses aus günstigsten Boden-gasverhältnisse in den ungarischen Karstgebieten unter den Eichen- und Buchen-Assoziationen entstehen und bereits die Gaserzeugung der Karstbuschwälder, insbesondere aber die der Steppenwiesenböden hinter jenen dieser Wälder zurückbleibt. Aber sogar in den Fichtenwäldern ist der Kohlendioxidgehalt des Bodens höher, als in der Steppenvegetation!

In der Rhizosphäre der Grasvegetation haben wir die CO_2 -Höchstwerte merkwürdigerweise bei der die Feuchtigkeit und Kühleit liebenden *Nardus stricta* am höchsten gefunden, was wir nur als spezifische Eigenschaften erklären können, denn die Wurzelzonen der in der Forschungszeit hinsichtlich der Erwärmung in wesentlich günstigeren Expositionen untersuchten Festucace und Carices hatten auch optimale Bodenfeuchtebedingungen.

Hier erwähnen wir, dass die wertvollen Untersuchungsergebnisse, worüber BALÁZS /1964/ berichtet, in bezug auf die beständigen Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung der Karstquellen der gemässigten Zone und den zu ihnen gehörigen Vegetationsverhältnissen der karstigen Einzugsflächen, bestätigen gleichfalls die grössere Kohlendioxidmenge in den

Boden Waldvegetationen, wodurch sie die kennzeichnende Durchsetzung der auf die Verkarstungsdynamik ausgeübten Wirkung des Vegetationscharakters betonen /Abb. 13/.

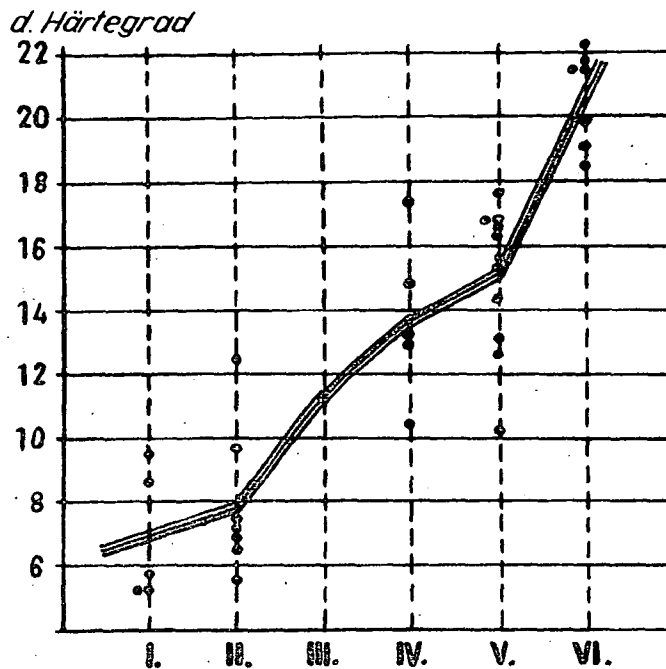


Abb. 13. Zusammenhang der Kalkhärte der Karstquellen unter der gemässigten Zone mit der Vegetationsbedekung, bzw. Vegetationstypen der ihnen angehörigen Karstoberflächen des Einzugsgebietes. Die römischen Ziffern bezeichnen die unten stehenden Gruppen /Angaben von BALÁZS/:

Gruppe	Oberflächenverteilung des Einzugsgebietes			Durchschnittliche Härte der untersuchten Wasserproben
	Wald	Wiese, Weide Buschwald	Felsige Kahlflä- che	
I.	-	0-10	80-100	7,0 nk ^o
II.	-	30-60	40-70	7,8 nk ^o
III.	max. 10	60-90	10-40	11,2 nk ^o
IV.	0-25	75-100	max. 10	13,7 nk ^o
V.	25-75	25-75	max. 10	13,0 nk ^o
VI.	75-100	0-25	max. 10	20,7 nk ^o

Bei der Beurteilung der Frage durften wir natürlich auch die Bodenlebewesen nicht ausser acht lassen, da die Bodentiere ja auch durch das Ausscheiden ihrer Stoffwechselprodukte zur Umwandlung der Verbindungen von Bodengasen unbedingt beitragen. Für die Bestimmung der Grössenordnung dieser Wirkungsseite und ihrer Durchsetzung in der Karstkorrosion sind aber bisher keine Untersuchungen vorgenommen worden.

- ANDÓ, M. /1959/: Mikroklimatikus sajátosságok a Tisza-ártér déli szakaszán /Mikroklimatische Besonderheiten im südlichen Teil des Überschwemmungsgebietes der Theiss/
- Földr. Ért. 1959. 3.
- AMBRUS, GY. /1965/: Különböző expozícióju lejtők talajhőmérsékleti vizsgálata egy középbérci töbörben /Untersuchungen der Bodentemperatur bei unterschiedlichen Hangexpositionen in der Doline Középbérc/
- egyetemi szakdolgozat, kézirat
/Manuskript/. JATE Éghajl.Int. Szeged
- BACSÓ-ZÓLYOMI /1934/: Mikroklima és növényzet a Bükkfennsíkön /Mikroklima und Vegetation auf dem Bükk-Plateau/ - Az Időjárás,
X /177-196/, 1934
- BALÁZS, D. /1964/: A vegetáció és a karsztkorrózió kapcsolata /Zusammenhang zwischen Vegetation und Karstkorrosion/ - Karszt és Barlang, 1964. I.
- BALLENEGGER, R. /1953/: Talajvizsgálóti módszerkönyv /Handbuch der Bodenuntersuchungsmethodik/
- Budapest, 1953.
- BALLENEGGER - di GLÉRIA /1962/: Talaj- és trágyavizsgálóti módszerek /Methoden der Boden- und Düngungsanalysen/ - Budapest, 1962.
- BOROWIEW-JEGOROW-KISSELEW /1951/: Rukowodstwo k laboratorno-praktitscheskim sanjatijam po semlewedelju /Kap. I-IV./ - Moskau, 1951.
- BÁRÁNY, I. /1967/: Der Einfluss des Niveauunterschiedes und der Exposition auf die Lufttemperatur in einer Doline im Bükkgebirge - Acta Climatologica Szegediensis, T. VII. Szeged, 1967.

- BECK, TH. /1968/: Mikrobiologie des Bodens - München-Basel-Wien, 1968.
- di GLÉRIA-KLIMES-SMYK-DVORACSEK /1957/: Talajfizika és talajkolloidika /Bodenphysik und Bodenkolloidlehre/ Teil IV-IX. rész - Budapest, 1957.
- FEHÉR, D. /1954/: Talajbiológia /Bodenbiologie/ - Budapest, 1954.
- FEKETE, Z. /1952/: Talajtan /Bodenkunde/ - Budapest, 1952.
- FEKETE, Z. /1958/: Talajtan és trágyázástan /Bodenkunde und Düngungslehre/ - Budapest, 1958.
- FEKETE-HARGITAI-ZSOLDOS /1964/: Talajtan és agrokémia /Bodenkunde und Agrochemie/ - Budapest, 1964.
- FUTÓ, J. /1962/: Mikroklimatikus mérések a Nagymezőn /Mikroklimatische Messungen auf dem Nagymező/ - Földr. Ért. 1962. 4.
- GEIGER, R. /1961/: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie - Die Wissenschaft, Bd. 78, 4. Auflage, Braunschweig 1961.
- GÖMÖRI, I. /1967/: Egy bükki töbör talajhőmérsékletének napi járása különböző expozíciókban /Tagesgang der Bodentemperatur bei unterschiedlichen Expositionen in einer Doline im Bükkgebirge/ - Egyetemi szakdolgozat, kézirat /Manuskript/, JATE Éghajl. Int. Szeged
- HORVAT, I. /1953/: Die Vegetation der Karstdolinen /Vegetacija Ponikova/ - Geografski Glasnik 14-15, Zagreb, 1953.

- JAKUCS, P. /1954/: Mikroklímamérések a Torna-karszton, tekintettel a fatömegprodukciora és a karsztfásításra /Mikroklímamessungen auf dem Karst von Torna mit Rücksicht auf die Holzmassenproduktion und die Aufforstung - des Karstes/ - Annal. Hist. - Nat. Musei Nationalis Hungarici, Tom, V. 1954.
- JAKUCS, P. /1955/: Geobotanische Untersuchungen und die Karstaufforstung in Nordungarn - Acta Botan. Hung. II. 1955.
- JAKUCS, P. /1956/: Karrosodás és növényzet /Karrenbildung und Vegetation/ - Földr. Közl. 1956. 3.
- JAKUCS, P. /1961/1/: Az Északi-Középhegység keleti felének növényzete /Vegetation der Osthälfte des Nördlichen Mittelgebirges/ - Földr. Ért. 1961. 3.
- JAKUCS, P. /1961/2/: Die Phytozoologischen Verhältnisse der Flaumeichen-Buschwälder Südosteuropas - Budapest, 1961.
- JAKUCS, P. /1962/: A domborzat és a növényzet kapcsolatáról /Über die Beziehung des Reliefs und der Vegetation/ - Földr. Ért. 1962. 2.
- LÁNG, S. /1953/2/: Természeti földrajzi tanulmányok az észak-magyarországi középhegységben /Physisch-geographische Studien im nordungarischen Mittelgebirge/ - Földr. Közl. 1953.
- SMYK-DRZAL /1954/: Untersuchungen über den Einfluss von Mikroorganismen auf das Phänomen der Karstbildung - Erdkunde, 18. 1964.
- STEFANOVITS, P. /1963/: Magyarország talajai /Die Böden Ungarns/ - Budapest, I. kiadás /Auflage/: 1956, II. kiadás: 1963.

- STOKLASA-ERNEST /1922/: Über den Ursprung etc. des CO₂ im Boden - Chemisch. Zeitung, 1922. 6.
- STOKLASA-DOERRELL /1926/: Biochemische und biophysikalische Erforschung des Bodens - Berlin, 1926.
- THOM-HUMFELD /1932/: Notes on the association of microorganisms and roots - Journ. Bacter. 1932. 23.
- TROMBE, F. /1951/2/: Quelques aspects des phénomènes chimiques souterrains - Annal. de Spéléologie, 1951.
- TROMBE, F. /1952/: Traité de spéléologie - Paris, 1952.
- TROMBE, F. /1956/: La spéléologie - Paris, 1956.
- WAGNER, R. /1954/: Fluktuáló töbörköd /Fluktuierender Dolinnennebel/ - Időjárás, 1954. 5.
- WAGNER, R. /1955/1/: A mikroklimák földrajzi elrendeződése Hosszubércen /Geographische Anordnung der Mikroklimas auf dem Hosszubérc/ - Időjárás, 1955.
- WAGNER, R. /1955/2/: A mikroklima fogalma és kutatási módszere a természeti földrajzi kutatásokban/Begriff des Mikroklimas und seine Forschungsmethode in den physisch-geographischen Forschungen/ - Földr. Ért. 1955.
- WAGNER, R. /1956/: Mikroklimatárségek és térképezésük /Mikroklimaräume und ihre Kartierung/ - Földr. Közl. 1956. 2.
- WAGNER, R. /1960/: Egy bükki töbör.felmelegedése és lehűlése /Erwärmung und Abkühlung einer Doline des Bükkgebirges/ - A Magyar Meteorológiai Társ. V. Vándorgyűlésének előadásai és tanulmányutjai. Miskolc-Bükkhegység-Eger. 1959. aug. 28-30. Budapest, 1960.

- WAGNER, R. /1963/: Der Tagesgang der Lufttemperatur einer Doline im Bükkgebirge - Acta Climat. Szegediensis, Tom. II-III. 1963.
- WAGNER, R. /1964/: Lufttemperaturmessungen in einer Doline des Bükkgebirges - Zeitschr. f. Angewandte Meteorologie, B. 5. 1964. 3-4.

F.k. : Dr.Jakucs László tanszékvezető egyetemi tanár

Készült a JATE sokszorosító műhelyében, Szeged.
Engedélyszám : 626/1971. - Méret : B/5.
Példányszám : 200. - F.v. : Papp László.